

Kristian Petäistö

## **Maankosteuden mittaaminen interferometrisella satelliittiradiometrillä**

**Sähkötekniikan korkeakoulu**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 22.2.2013.

**Työn valvoja:**

Prof. Martti Hallikainen

**Työn ohjaaja:**

DI Jaakko Seppänen



**Aalto-yliopisto**  
Sähkötekniikan  
korkeakoulu

Tekijä: Kristian Petäistö

Työn nimi: Maankosteuden mittaaminen interferometrisella  
satelliittiradiometrillä

Päivämäärä: 22.2.2013

Kieli: Suomi

Sivumäärä: 8+46

Radiotieteen ja -tekniikan laitos

Professori: Avaruustekniikka

Koodi: S-92

Valvoja: Prof. Martti Hallikainen

Ohjaaja: DI Jaakko Seppänen

Diplomityö käsittelee maankosteuden mittaamista interferometrisella satelliittiradiometrillä. Euroopan Avaruusjärjestön (ESA) SMOS-satelliitti, joka laukaistiin marraskuussa 2009, mittaa maan lähettämää lämpösäteilyä matalalla 1,4 GHz taajuudella. Eräs tärkeä maapallon ilmastoon vaikuttava tekijä on vesi, jonka kiertokulkua voidaan tutkia mittaamalla satelliitin avulla maankosteutta ja valtamerien suolapitoisuutta. Tämä työ keskittyy SMOS-satelliitin mittausaineistoon ja sen prosessointiin Suomen alueella. Suomen alue on satelliittimittaukselle haasteellinen useastakin syystä; pinta-alasta yli 70 % on metsän peitossa ja noin 20 % on soita tai kosteikkoja. Näiden maankäyttötyyppien lähettämän lämpösäteilyn intensiteetti poikkeaa avointen alueiden lähettämän säteilyn intensiteetistä ja tämä on haastavaa ESA:n maankosteusmallille. Työssä pyritään ESA:n maankosteusmallin kasvillisuusparametreja muokkaamalla mallintamaan paremmin tietyn tyyppistä metsää. Tuloksia verrataan Suomen ympäristökeskuksen hydrologiseen malliin Varsinais-Suomen alueella sekä automaattisilta mittausasemilta saatuihin tuloksiin. Lopuksi tarkastellaan muokatuin parametrein saatuja tuloksia suhteessa ESA:n jakamaan aineistoon.

Avainsanat: SMOS, satelliitti, interferometrinen radiometri, kaukokartoitus,  
maankosteus

Author: Kristian Petäistö

Title: Measuring Soil Moisture Content with an Interferometric Satellite Radiometer

Date: 22.2.2013

Language: Finnish

Number of pages:8+46

Department of Radio Science and Engineering

Professorship: Space Technology

Code: S-92

Supervisor: Prof. Martti Hallikainen

Instructor: M.Sc.(Tech.) Jaakko Seppänen

This thesis deals with measuring soil moisture content using a satellite interferometric radiometer. The European Space Agency's (ESA) SMOS satellite was launched in November 2009 and is constantly measuring thermal radiation emitted by the Earth at a frequency of 1.4 GHz. One important factor affecting the Earth's climate is the water cycle, which can be studied by measuring global soil moisture content and ocean salinity from satellites. This work focuses on SMOS data and its processing for retrieval of soil moisture in Finland. Finland's land area is a challenge for several reasons; more than 70 % is covered by forests and about 20 % by marshes or wetlands. These surface types emit thermal radiation, the magnitude of which is different from that for non-vegetated terrain. Taking the effect of vegetation into account is challenging to the ESA soil retrieval model. This work aims to modify the vegetation parameters of the model to match more specific types of forest. The results are compared with the Finnish Environment Institute's hydrological model in southwestern Finland and using data collected from automated measuring stations. Finally, we compare our soil moisture results with those distributed by ESA.

Keywords: SMOS, Satellite, Interferometric Radiometer, Remote Sensing, Soil Moisture

# Esipuhe

Tämä diplomityö on osa TEKES-rahoitteista NORA-projektia, jossa tutkitaan ja kehitetään kaukokartoitukseen perustuvia maankosteusmittauksia pohjoisella havumetsävyöhykkeellä. Diplomityön teko ajoittui reilun puolen vuoden työsuhteeseen Aalto-yliopiston Radiotieteen ja -tekniikan laitoksella.

Pitkä prosessi alkaa olla takana päin. Aivan ensiksi tahdon kiittää ohjaajaani Jaakkoa asiantuntevasta ja hyvästä ohjauksesta. Toiseksi tahtoisin osoittaa kiitokseni professori Hallikaiselle lukuisista kommenteista ja parannusehdotuksista, sekä mahdollisuudesta työskennellä erittäin mielenkiintoisen aiheen parissa. Kolmanneksi osoitan kiitokseni Jaanalle, Peterille, Lucakselle ja Antonille loppumattomasta kärsivällisyydestä ja tuesta opintojani kohtaan.

Espoossa 22.2.2013

Kristian Petäistö

# Sisältö

<b>Tiivistelmä</b>	<b>ii</b>
<b>Tiivistelmä (englanniksi)</b>	<b>iii</b>
<b>Esipuhe</b>	<b>iv</b>
<b>Sisällysluettelo</b>	<b>v</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>2 SMOS-satelliitti</b>	<b>2</b>
2.1 Historia ja tavoitteet . . . . .	2
2.2 MIRAS-radiometri . . . . .	3
<b>3 Teoreettinen tausta</b>	<b>6</b>
3.1 Maankosteuden mittaaminen . . . . .	6
3.2 Radiometria ja terminen säteily . . . . .	7
3.3 Interferometria . . . . .	9
<b>4 Algoritmin teoreettinen tausta</b>	<b>12</b>
4.1 Aggregoitu säteenkuljetusyhtälö . . . . .	13
4.2 Kasvillisuuden vaikutus emissioon . . . . .	14
4.2.1 Paljas maa . . . . .	14
4.2.2 Dobsonin dielektrinen malli . . . . .	14
4.2.3 Mironovin dielektrinen malli . . . . .	15
4.2.4 Matala kasvillisuus . . . . .	17
4.2.5 Metsä . . . . .	18
4.2.6 Muu maankäyttö . . . . .	18
4.3 Prosessorin päättelypuu . . . . .	19
<b>5 Menetelmät ja testiaineisto</b>	<b>22</b>
5.1 Hypöistenkoski . . . . .	23
5.2 Automaattiasemat . . . . .	25
5.3 Syöttöparametrien ja maankäyttöluokkien muokkaus . . . . .	26
5.3.1 Lehtialaindeksin kertoimen muokkaus . . . . .	27

5.3.2	Pinnankarkeus . . . . .	28
5.4	Radiotaajusten häiriöiden suodatus . . . . .	28
<b>6</b>	<b>Tulokset</b>	<b>30</b>
6.1	Hypöistenkosken yläpuolinen mittausalue . . . . .	30
6.2	Testialueet . . . . .	31
6.2.1	Lehtialaindeksin kertoimen muokkaus . . . . .	32
6.3	Pinnankarkeuden muokkaus . . . . .	34
6.3.1	Testialueet . . . . .	35
6.4	Radiotaajuiset häiriöt . . . . .	36
<b>7</b>	<b>Vertailua ESA:n jakamaan Level 2 -dataan</b>	<b>38</b>
<b>8</b>	<b>Yhteenveto</b>	<b>41</b>
	<b>Viitteet</b>	<b>44</b>
	<b>Liite A</b>	<b>45</b>
	<b>A Ecoclimap -maanpintaluokittelu</b>	<b>45</b>
	<b>Liite B</b>	<b>46</b>
<b>B</b>	<b>Prosessoinneissa käytetyt ylilennot</b>	<b>46</b>
B.1	Nousevat ylilennot 2011 . . . . .	46
B.2	Laskevat ylilennot 2011 . . . . .	46
B.3	Nousevat ylilennot 2012 . . . . .	46

## Symbolit ja lyhenteet

### Symbolit

$B$	kaistanleveys
$c$	valon nopeus
$e$	emissiokerroin
$f$	taajuus
$h$	antennin korkeus
$k$	aaltoluku
$k_B$	Boltzmannin vakio
$n$	taitekerroin
$P$	teho
$r$	heijastuskerroin
$T$	lämpötila
$T_B$	kirkkauslämpötila
$TB_H$	maanpintaan nähden horisontaalisesti polarisoitunut kirkkauslämpötila
$TB_V$	maanpintaan nähden vertikaalisesti polarisoitunut kirkkauslämpötila
$T_g$	maan lämpötila
$T_R$	vastaanottimen kohinalämpötila
$T_s$	maan pintalämpötila
$T_\Omega$	kirkkauslämpötilatiheys
$T_{ant}$	antennin lämpötila
$T_{ph,rec}$	vastaanottimen fyysinen lämpötila
$V$	näkyvyysfunktio
$C$	suhteellinen savimäärä
$S$	suhteellinen hiekkamäärä
$SM$	maankosteus [ $m^3/m^3$ ]
$\gamma$	kasvillisuuden vaimennuskerroin
$\Delta\Omega$	antennin keilan avaruuskulma
$\epsilon_r$	suhteellinen permittivisyys
$\eta$	suuntakosini $\sin\theta \sin\phi$
$\kappa$	normalisoitu vaimennuskerroin
$\lambda$	aallonpituus
$\xi$	suuntakosini $\sin\theta \cos\theta$
$\rho$	tiheys
$\tau$	optinen paksuus
$\omega$	kasvillisuuden sirontaparametri

**Lyhenteet**

ADF	Apudata (Auxiliary Data Files)
DFFG	Diskreetti pieni hila (Discrete Flexible Fine Grid)
DGG	Diskreetti globaali hila (Discrete Global Grid)
ESA	Euroopan avaruusjärjestö (European Space Agency)
L2	Taso 2 (Level 2)
LICEF	Kevyt kustannustehokas etupää (Lightweight Cost-effective frontend)
MIRAS	Apertuurisynteesiä käyttävä interferometrinen radiometri (Microwave Interferometric Radiometer with Aperture Synthesis)
RTE	Säteilynkuljetusyhtälö (Radiative Transfer Equation)
SMOS	Maankosteutta ja meren suolapitoisuutta mittaava satelliitti (Soil Moisture and Ocean Salinity)
SYKE	Suomen Ympäristökeskus (Finnish Environment Institute)
TEC	Elektronijakauma (columnar electron content)



# 1 Johdanto

Maankosteus on tärkeä muuttuja veden kiertokulun tutkimuksessa, myrskyjen ja tulvien sekä ilmastonmuutoksen ennustamisessa. Veden dielektriivisyys ja sen suhde emissiivisyyteen mikroaaltotaajuuksilla mahdollistaa maankosteuden määrittämisen emissiota mittaamalla. Paljaalla maalla emissiivisyys on mikroaaltotaajuuksilla lähes lineaarisesti maankosteuden funktio. Kasvillisuus vaimentaa emissioita, mutta mikroaaltotaajuuksilla sen vaikutus on melko pientä biomassan ollessa alle  $5 \text{ kg/m}^2$ . Maan maapinta-alasta noin 65 % täyttää tämän ehdon. Erityisesti on havaittu, että L-alueella mittausherkkyyys on hyvä, kun taas kasvillisuuden, ilmakehän ja pinnan-karkeuden vaikutukset ovat vähäisiä. [1]

SMOS-satelliitti mittaa maanpinnan lämpösäteilyä avaruudesta käsin. Tässä diplomityössä tutkitaan satelliitin mittaamasta datasta prosessoidun maankosteusaineiston luotettavuutta sekä maankosteusprossessorin toimintaa. Prosessoituja maankosteusarvoja verrataan muun muassa Suomen ympäristökeskuksen mittausasemilla mitattuihin maankosteusarvoihin. Suomi on SMOS-satelliitille haasteellinen mittausalue metsäisyyden takia. Tämän takia myös datan analysoinnissa ja käsittelyalgoritmeissa on yhä paljon kehittämistä.

Työn toisessa luvussa esitellään työhön liittyvä satelliitti. Luvuissa 3 ja 4 käsitellään mittaukseen liittyvää teoriaa ja maankosteusprossessorin toimintaa. Luvussa 5 esitellään käytettävät menetelmät sekä testiaineisto ja luvuissa 6 – 8 esitellään tuloksia sekä yhteenveto työstä.

## 2 SMOS-satelliitti

### 2.1 Historia ja tavoitteet

SMOS-missio sai alkunsa uuden teknologian ja meteorologian tarpeiden konjunktios-  
ta. Tiedettiin, että maankosteus- ja meren pintasuolaisuus-tietojen avulla voidaan  
parantaa olemassa olevia meteorologiaan ja ilmastoon liittyviä malleja. Dataa näistä  
kahdesta suuresta ei kuitenkaan ollut saatavilla globaalisti eikä myöskään tarpeek-  
si tiheällä aikasyklillä. SMOS-mission tavoitteeksi asetettiin täyttää tämä tietovaje  
tieteellisten päätavoitteiden (taulukko 1) ollessa maanpinnan maankosteus ja meren  
pintasuolaisuus globaalisti ( $\pm 80^\circ$  leveyspiiri) vähintään 4 % tarkkuudella kolmen  
päivän välein. [2]

Taulukko 1: SMOS-mission päätavoitteet.

Meren suolapitoisuus	0,1 psu tarkkuudella 30 päivän välein 200 km:n spatiaalisella resoluutiolla
Maankosteus	0,04 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> tarkkuudella joka kolmas päivä
Kryosfääri	lumipeitteen ja jään tarkkailu (kokeiluluontoinen)

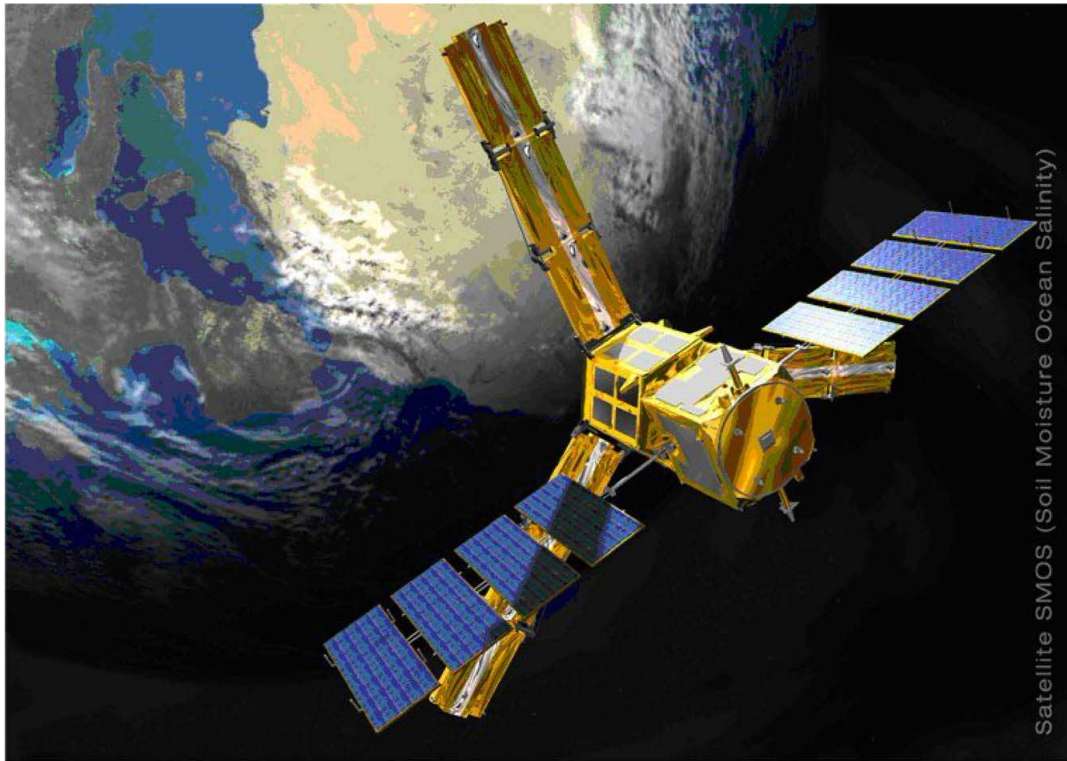
Mission korkeiden vaatimusten takia valmista satelliittitekniikkaa ei ollut, joten  
SMOS-satelliittiin kehitettiin uudenlainen instrumentti, joka muodostaa kirkkaus-  
lämpötilakuvan interferometristen periaatteiden mukaisesti käyttämällä useita pie-  
niä vastaanottimia.

SMOS-satelliitin interferometrinen radiometri toimii 1,400 – 1,427 GHz taajuuskais-  
talla, joka on rauhoitettu radiotietoliikenteeltä. Instrumentti vastaanottaa maanpin-  
nan emittoimaa säteilyä, jonka on havaittu korreloivan maan pintakerroksen (muu-  
tama senttimetri) kosteuspitoisuuden ja meren pintasuolaisuuden kanssa erityisesti  
L-alueella.

Taulukossa 2 on kuvattu datan sisältöä eri SMOS-datatasoilla [3]. Kuten taulukos-  
ta voi huomata, mittauksen raakadata-aineistoa prosessoidaan useita kertoja en-  
nen kuin se muuttuu maankosteusaineistoksi. Diplomityön laajuuden puitteissa ei  
ole mahdollista käsitellä jokaista prosessointivaihetta kovin laajasti, vaan keskitym-  
me enimmäkseen L2-prosessoriin, jonka tuotteena kirkkauslämpötila-aineistosta saa-  
daan maankosteusdataa.

SMOS-satelliitti laukaistiin onnistuneesti 2. marraskuuta 2009, ja se kiertää maa-  
ta aurinkosynkronisella radalla 758 kilometrin korkeudessa. [4] Taiteilijan näkemys  
SMOS-satelliitista on esitetty kuvassa 1.

Taulukko 2: SMOS-datatasot	
Raakadata	Satelliitista vastaanotettu raakadata
Level 0	Havainnot (ristikorrelaatiot, NIR)
Level 1a	kalibroidut näkymät Satelliitin paikkatiedot
Level 1b	Kuvanmuodostus algoritmilla korjatut kirkkauslämpötilakartat antennitasossa
Level 1c	Kirkkauslämpötilakartat sekä näihin liittyvä tieto maatasossa
Level 2	Maankosteus ja meren suolapitoisuus samalla resoluutiolla kuin Level 1-tasossa
Level 3	Level 2-tason spatiaalinen ja ajallinen aggregointi



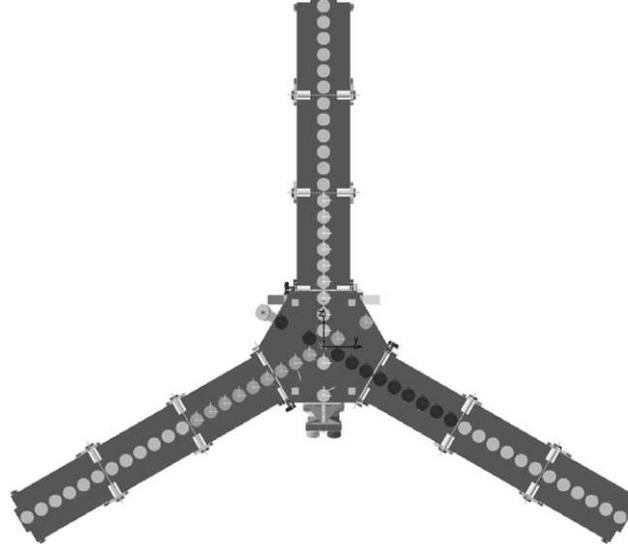
Kuva 1: Taiteilijan näkemys SMOS-satelliitista. [5]

## 2.2 MIRAS-radiometri

SMOS satelliitin mittalaitetta kutsutaan MIRAS-instrumentiksi (*Microwave Interferometric Radiometer with Aperture Synthesis*). MIRAS on ensimmäinen satelliittikäyttöinen interferometrinen radiometri, ja sen ansiosta satelliitilla voidaan kuvata laajoja alueita ilman vastaanottimien mekaanista kääntelyä. [6]

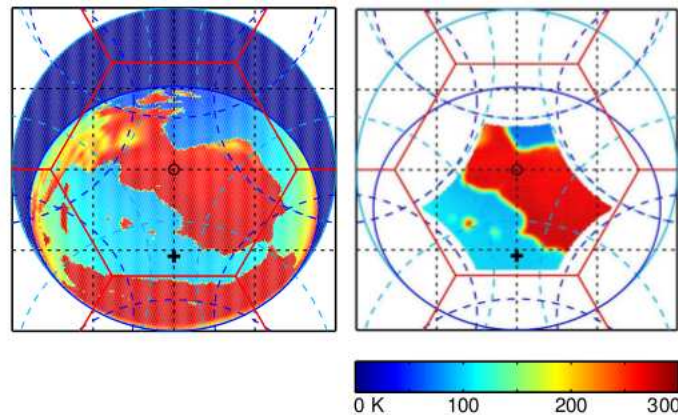
Apertuurilla on kolme haaraa, jotka ovat keskenään  $120^\circ$  kulmassa, ja joissa kussakin

on 21 L-alueen radiometriä. Haaroissa olevien LICEF-etupäiden lisäksi haarojen välissä on kaksi redundanttia LICEFia ja kolme täyspolarimetristä NIR-kohinainjektioradiometriä. MIRAS -instrumentin topologia on esitetty kuvassa 2. MIRAS-instrumentin halkaisija haarat levitettynä on noin 8 metriä.



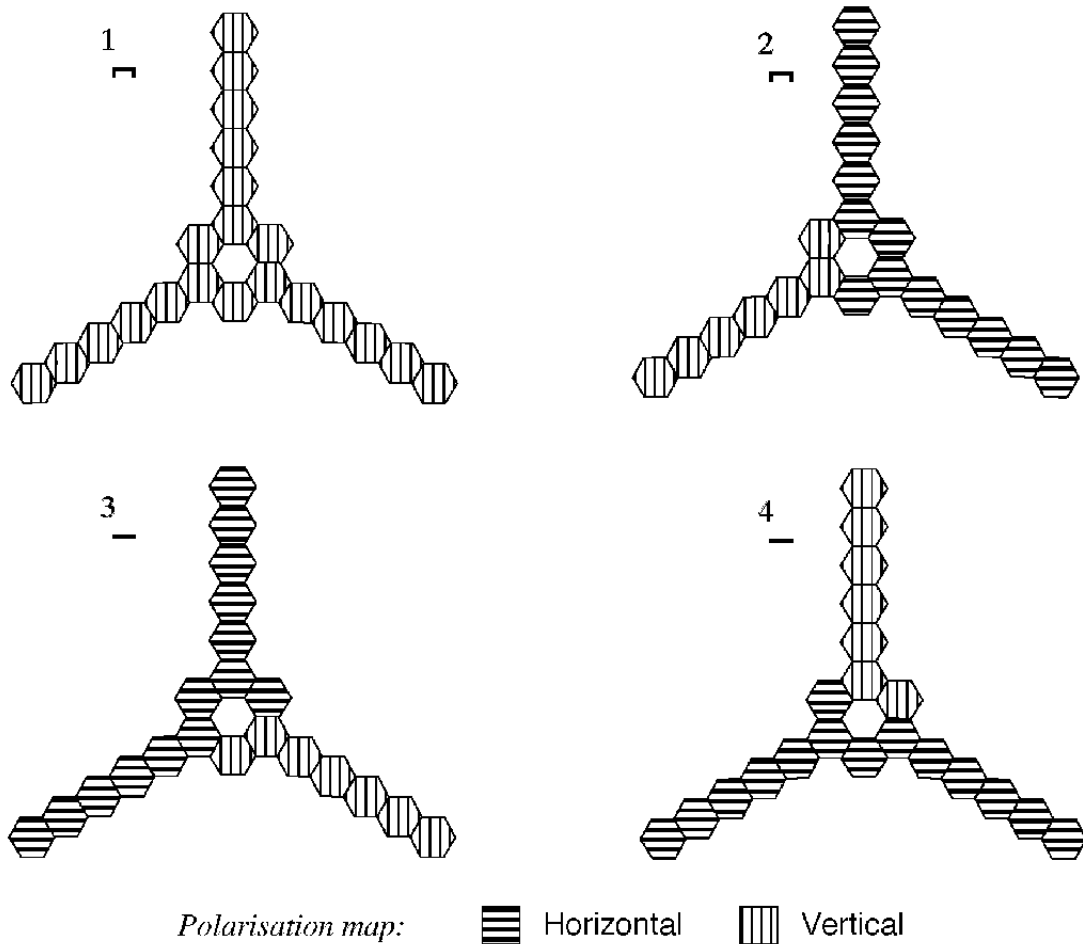
Kuva 2: MIRAS-instrumentin topologia. [3]

Vierekkäisten elementtien etäisyys toisistaan on optimoitu kulmaresoluution mukaan, ja se on  $d = 0,875\lambda$ . Nyqvistin kriteeri heksagonaaliselle näytteistykselle ( $d = 1/\sqrt{3}\lambda$ ) ei täyty, joten kirkkauslämpötilakuva kärsii aliaksista. [3] Käytännössä antenninäkömää kattaa halkaisijaltaan lähes 3000 kilometrin alueen, mutta interferometrisestä periaatteesta ja Y-muotoisesta antennikombinaatiosta johtuen yksikäsitteinen aliasvapaa-alue on halkaisijaltaan noin 1000 kilometrin suuruinen heksagonaalinen alue (kuva 3). [4]



Kuva 3: Kirkkauslämpötila Iberian niemimaan testialueelta. Katkoviivoilla erottuvat maan aliakset. Taivaan kirkkauslämpötilan ollessa pieni aliasvapaata aluetta voidaan venyttää hieman oikeanpuoleisen kuvan mukaisesti. [7]

MIRAS voi toimia kahdessa eri toimintamoodissa. Kaksoispolarimetrisessä moodissa MIRAS mittaa kirkkauslämpötilaa horisontaali- ja vertikaalipolarisaatiossa. Täyspolarimetrisessä moodissa vastaanottimien polarisaatiot vaihtelevat integrointijakson aikana kuvan 4 mukaisesti. Vaiheessa 1 kaikki vastaanottimet on kytketty mittaamaan vertikaalipolarisaatiota. Vaiheissa 2–4 yksi haaroista mittaa vertikaalipolarisaatiota ja kaksi muuta horisontaalipolarisaatiota. Ensimmäisen integrointijakson aikana muodostuu täydellinen vertikaalisesti polarisoitunut tähden muotoinen näkyvyysfunktio. Jälkimmäisten jaksojen 2–4 aikana muodostuu vajaat tähtikuviot. Näistä kombinoidaan täysi näkyvyysfunktio, jossa on informaatiota kummastakin polarisaatiosta. [8] Tässä työssä prosessoidaan ainoastaan täyspolarimetrisessä moodissa suoritettuja mittauksia.



Kuva 4: Antennien polarisaatiot integrointijakson aikana. Vaihe 1 kestää 1,2 sekuntia ja vaiheista 2–4 kukin kestää 0,4 sekuntia. [8]

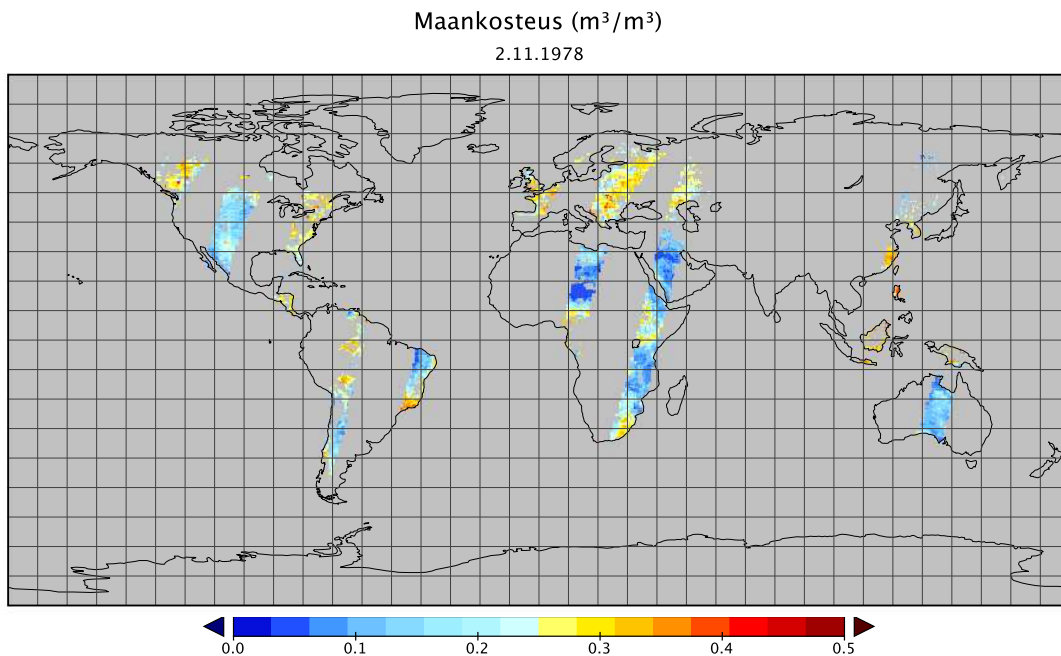
### 3 Teoreettinen tausta

Maaperän kosteuden perusteella voidaan ennustaa muun muassa ilmastonmuutoksen kehittymistä, tulvia ja myrskyjä. Haihtuessaan veden lämpötila laskee, ja samalla ilmankosteus nousee. Lämpimämmässä ilmastossa haihtumista tapahtuu enemmän. Tämän voi huomata esimerkiksi saunassa, kun heittää löylyä.

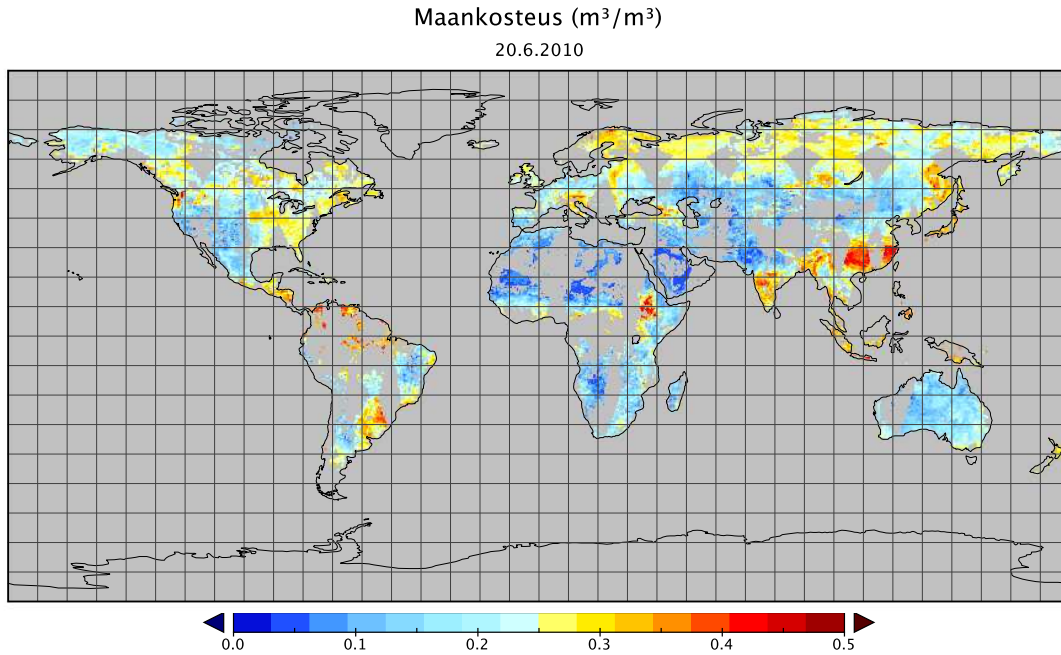
#### 3.1 Maankosteuden mittaaminen

Maankosteuden mittaaminen maailmanlaajuisesti maasta käsin on työlästä, johtuen sen aika- ja paikkariippuvuudesta. Sen sijaan satelliitin avulla voidaan saada koko maapallon kattavaa tietoa huomattavasti vaivattomammin.

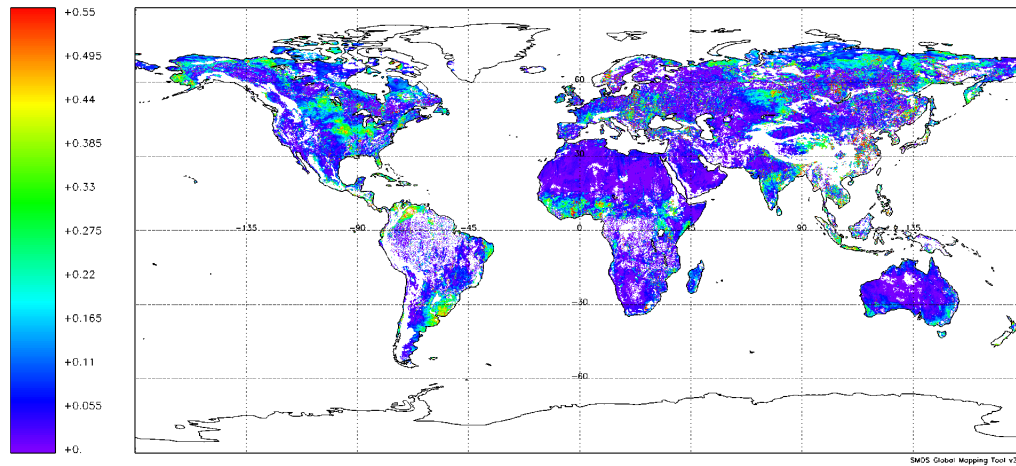
Satelliittipohjaisia mittauksia on tehty vuodesta 1978 asti. Havaintoja tehneitä passiivisten instrumenttien asemia ovat olleet Nimbus 7 SMMR, DMSP SSM/I, TRMM TMI ja Aqua AMSR-E ja aktiivisten ERS-1, ERS-2 ja METOP-A. Useimmat satelliitit eivät kuitenkaan ole mitanneet matalimmalla mahdollisella taajuusalueella, johtuen siitä, että niiden päätehtävänä ei ole maankosteuden mittaaminen. Kuvat 5 – 7 havainnollistavat maankosteusmittauksien kehitystä vuodesta 1978 vuoteen 2010. [9]



Kuva 5: SMMR-sensorilla mitattu maankosteus 2.11.1978. [10] [11]



Kuva 6: AMSR-E ja ASCAT-sensoreilla mitattu maankosteus 20.6.2010. [10] [11]



Kuva 7: SMOS-satelliitilla mitattu maankosteus [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ] 20-23.6.2010. [12]

### 3.2 Radiometria ja terminen säteily

Kappaleiden emissiosäteilyä verrataan usein mustan kappaleen säteilyyn. Musta kappale on ideaalinen kappale, joka säteilee lämpötilassa  $T$  aina vähintään yhtä paljon energiaa kuin mikä tahansa muu kappale samassa lämpötilassa. Musta kappale myös absorboi kaiken siihen tulevan tehon. Mikäli vastaanottimen antenni suunnataan lämpötilassa  $T$  olevan mustan kappaleen pintaan siten, että säteilykeila sieppaa kaiken säteilytehon, saadaan vastaanottoimeen kohinateho

$$P = k_B T B \quad (1)$$

Useimmiten pinta on kuitenkin "harmaata", jolloin kohinateho saadaan korvaamalla yhtälössä (1) esiintyvä lämpötila kirkkauslämpötilalla, joka tarkoittaa kappaleen tuottamaa säteilyä suhteessa mustan kappaleen säteilyyn:

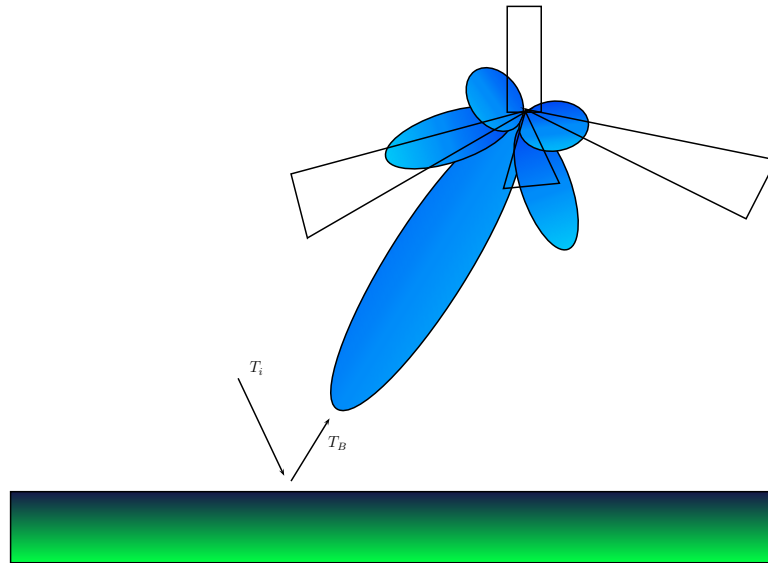
$$T_B = eT \quad (2)$$

missä  $e$  on kyseisen pinnan emissiokerroin eli tehonläpäisykerroin. Mustalle kappaleelle  $e = 1$ , johteelle  $e = 0$ , ja muille pinnoille  $0 < e < 1$ . Heijastuskertoimen ja emissiokertoimen välillä on yhteys

$$e = 1 - |\rho|^2 \quad (3)$$

Radiometria perustuu siihen, että lämpötilan ohella myös pinnan emissiokerroin vaihtelee. Näin ollen mittaamalla kirkkauslämpötilaa saadaan tietoa pinnan ominaisuuksista. [13] [14]

Tarkastellaan kuvaa 8. Yleisesti tietyssä suunnassa  $(\theta, \phi)$  sijaitsevaa kohinalähdettä voidaan ilmaista efektiivisellä kohinalämpötilalla  $T_B(\theta, \phi)$ , jota myös kirkkauslämpötilaksi kutsutaan.



Kuva 8: Kirkkauslämpötilaa mittaava radiometri. Haitallisista sivukeiloista pyritään pääsemään eroon antennisuunnittelun avulla.

Säteily kyseisestä suunnasta on tällöin  $N(\theta, \phi) = k_B T(\theta, \phi) B$ . Antennin lämpötila saadaan tällöin keskiarvona integroimalla kunkin säteilylähteen yli

$$T_{ant} = \frac{1}{\Delta\Omega} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} T_B(\theta, \phi) G(\theta, \phi) \quad (4)$$



missä  $\Delta\Omega$  on antennin pääkeilan avaruuskulma ja  $G(\theta, \phi)$  on antennin vahvistus kyseiseen suuntaan. Pääkeilan avaruuskulmalla ja vahvistuksella on yhteys

$$\Delta\Omega = \int_0^\pi \int_0^{2\pi} G(\theta, \phi) d\Omega \quad (5)$$

Täten yhtälö (4) voidaan kirjoittaa joko antennin suuntaavuuden tai sieppauspinta-alan avulla [15]

$$T_{ant} = \frac{1}{4\pi} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} T_B(\theta, \phi) D(\theta, \phi) d\Omega = \frac{1}{\lambda^2} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} T_B(\theta, \phi) A(\theta, \phi) d\Omega \quad (6)$$

### 3.3 Interferometria

Kaukokartoitus asettaa tiukat vaatimukset radiometrille. Yksiantennisella radiometrillä voidaan mitata kirkkautta, mutta keilan ollessa leveä säteilyn suunnasta ja määrästä ei yleensä saada tarkkoja havaintoja. Rayleigh'n kriteerin [16]

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{h} \quad (7)$$

avulla voidaan laskea tarvittava apertuurikoko  $h$ , kun halutaan tietty kulmaresoluutio  $\Delta\theta$ . Esimerkkinä tarkastellaan 750 kilometrin korkeudessa lentävää satelliittia, jonka halutaan mittaavan säteilyä 40 kilometrin resoluutiolla taajuudella 1,4 GHz. Yhtälö (7) antaa tällöin

$$h = \frac{c}{1,4 \text{ GHz} \cdot \arctan(40/750)} \approx 4,0 \text{ m} \quad (8)$$

Tarvittavan apertuuriantennin koko olisi tällöin kohtauskulmalla  $0^\circ$  noin neljä metriä. Satelliittiin ei ole käytännöllistä sijoittaa näin isoa apertuuria, etenkin kun sitä jouduttaisiin mekaanisesti suuntimaan kohti haluttua mittausaluetta.

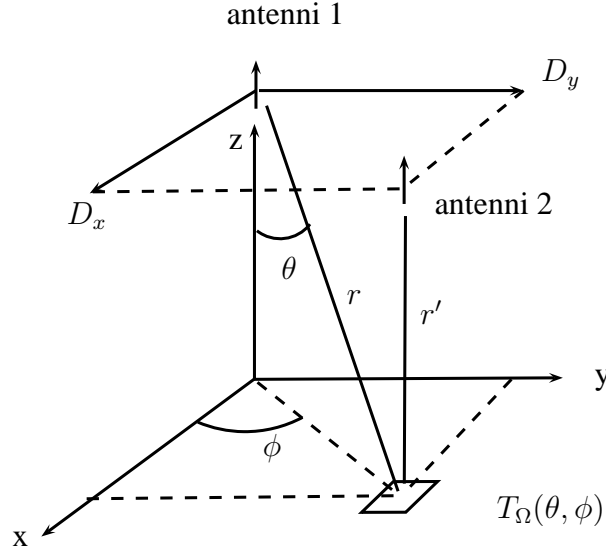
Ratkaisu ongelmaan löytyy interferometriasta. Interferometrisessa radiometrissä on useita antennia tasossa, joka on kohtisuorassa mitattavaan suuntaan nähden (ks. kuva 9).

Esimerkkinä tarkastellaan ei-pistemäistä kohdetta, jonka kirkkauslämpötila on  $T_\Omega(\theta, \phi)$ . Tässä termi  $T_\Omega$  kuvaa kirkkauslämpötilatiheyttä yhtä steradiaania kohti.

Jos antennit ovat isotrooppisia, niiden vastaanottama teho steradiaania kohden on

$$P_{inc}(\theta, \phi) = \frac{1}{2} S_{inc}(\theta, \phi) A_{iso} B \quad (9)$$

missä  $P_{inc}$  on teho [W/st],  $A_{iso}$  on antennien sieppauspinta-ala ja  $B$  signaalin kaistanleveys [Hz]. Selvennyksen vuoksi alaindeksi *inc* kertoo että vastaanotin on tässä vaiheessa isotrooppinen. Tätä tehoa vastaava kirkkauslämpötila on



Kuva 9: Maata kuvaava kaksiantenninen interferometri.

$$T_{\Omega,inc}(\theta, \phi) = \frac{1}{kB} P_{inc}(\theta, \phi) \quad (10)$$

Ei-isotrooppiselle antennille vastaanotettu kirkkauslämpötila steradiaania kohti saadaan kertomalla edellinen antennin vahvistuksella:

$$T_{\Omega}(\theta, \phi) = T_{\Omega,inc}(\theta, \phi) G(\theta, \phi) \quad (11)$$

Lopulta mitattu kirkkauslämpötila saadaan integroimalla yhtälö (11) avaruuskulman yli:

$$T_B = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} T_{\Omega}(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \quad (12)$$

Palataksemme kuvaan 9, määritellään käsite näkyvyysfunktio. Samaa kirkkauslämpötilajakaumaa kuvaavan antenniparin ristikorrelaatio tuottaa näkyvyysfunktion

$$V(u, v) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} T_{\Omega}(\theta, \phi) e^{j2\pi(u \sin \theta \cos \phi + v \sin \theta \sin \phi)} \sin \theta d\theta d\phi \quad (13)$$

missä  $V$ :n yksikkö on Kelvin, ja  $u = D_x/\lambda$  ja  $v = D_y/\lambda$ . Yhtälö 13 on interferometrisessä radiometriassa keskeinen, ja sen johto löytyy viitteestä [17].

Kirkkauslämpötila kuva muodostetaan tekemällä yhtälölle 13 käänteinen Fourier-muunnos:

$$T_B(\theta, \phi) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} V(u, v) e^{j2\pi(u \sin \theta \cos \phi + v \sin \theta \sin \phi)} \sin \theta du dv \quad (14)$$

Äärellisestä intergointiajasta johtuen kaikissa mikroaalloilla tapahtuvissa radiometrimittauksissa vallitsee tietty kohinataso, joka määritellään

$$\Delta T = \frac{T_B + T_R}{\sqrt{B_\tau}} \quad (15)$$

SMOS-satelliitin mittauksista muodostetaan kirkkauslämpötila edellä kuvattua aperatuurisynteesiä käyttäen kullekin antenniparille suunnassa  $(\xi, \eta) = (\sin \theta \cos \phi, \sin \theta \sin \phi)$  Fourier-muunnoksen avulla: [17] [18]

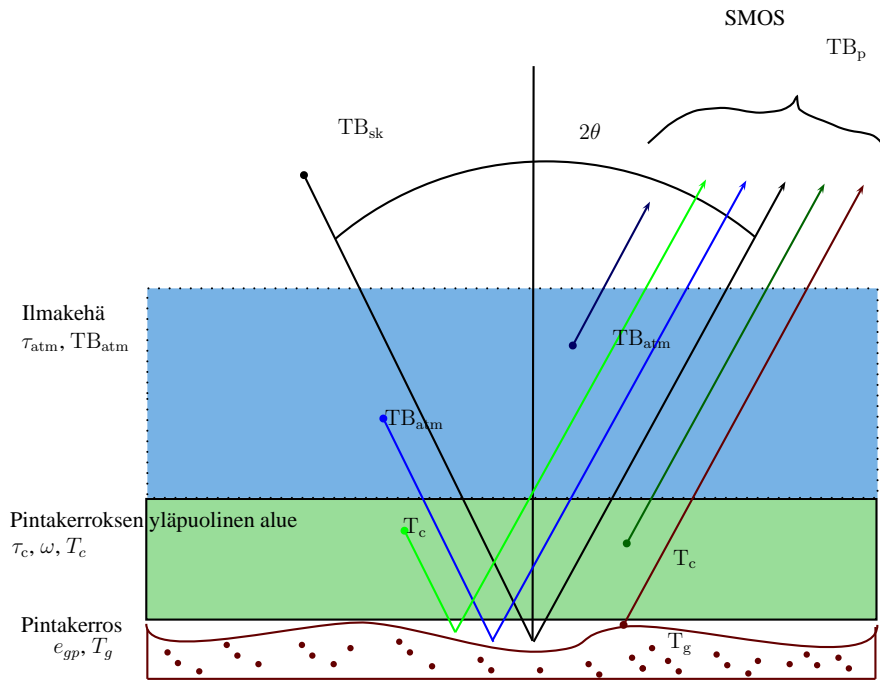
$$V(u, v) = \frac{1}{k_b \sqrt{B_1 B_2} \sqrt{G_1 G_2}} \frac{1}{2} \quad (16)$$

$$T(\xi, \eta) = \frac{F_{n1}(\xi, \eta) F_{n2}^*(\xi, \eta)}{\sqrt{\Omega_1 \Omega_2}} \frac{T_B(\xi, \eta) - T_{ph, rec}}{\sqrt{1 - \xi^2 - \eta^2}} \quad (17)$$

## 4 Algoritmin teorettinen tausta

Algoritmissa maankosteuden määrittäminen perustuu mitatun ja mallinnetun kirkkauslämpötilan sovittamiseen. Tässä luvussa tarkastellaan kirkkauslämpötilan mallintamista ja merkittävimpiä siihen liittyviä tekijöitä.

SMOS-resoluutiolla (keskimäärin 40 km) maanpinta ei tavallisesti ole homogeenista, vaan koostuu usein vesistöistä, matalasta ja korkeasta kasvillisuudesta, sekä mahdollisesti jää- tai lumipeitteisistä alueista. SMOS-satelliitin mittaama kirkkauslämpötila muodostuu kaikkien pikselin alalla vaikuttavien kohteiden kirkkauslämpötiloista. Jotkin ominaisuudet (esim. maanpinnan rakenne ja maankäyttö) saadaan staattisista kartoista kun taas osa on peräisin säätiedoista (esim. lämpötila ja lumi).



Kuva 10: Kirkkauslämpötilojen osuudet.

Kuvan 10 kirkkauslämpötilojen kombinaationa saadaan säteenkuljetusyhtälö

$$TB_p = TB_{atu} + TB_{sp}e^{-\tau_{atu}} + (TB_{atd} + TB_{sk}e^{-\tau_{atd}})r_{sp}e^{-\tau_{atu}} \quad (18)$$

missä  $TB_{sk}$  on taivaan kirkkauslämpötila,  $TB_{atu}$  ilmakehästä nouseva kirkkauslämpötila,  $TB_{atd}$  ilmakehästä laskeva kirkkauslämpötila,  $\tau_{atd}$  ilmakehän optinen paksuus alaspäin ja  $\tau_{atu}$  ilmakehän optinen paksuus ylöspäin. Kaikki termit riippuvat taajuudesta ja tarkastelu kulmasta suhteessa maanpinnan normaaliin. Alaviite p viittaa polarisaatioon ja alaviite s viittaa tässä yhteydessä kombinoituihin tasoihin.

Pintamuuttujien kuten lämpötilan ja kasvillisuuden karkeuden vaikutus pinnan heijastavuuteen  $r_{sp}$  huomioidaan pintakirkkauslämpötilassa

$$TB_{sp} = e_{sp}T_s \quad (19)$$

missä  $e_{sp}$  on pintaemissiivisyys ( $e_{sp} \cong 1 - r_{sp}$ ) ja  $T_s$  on efektiivinen (fysikaalinen) pinnan lämpötila. Paljaalle maalle  $T_s$  johtaa maan lämpötilojen painotettuun summaan  $T_g$  joka huomioi myös tunkeutumissyvyyden. [19]

## 4.1 Aggregoitu säteenkuljetusyhtälö

Kirkkauslämpötila saadaan aggregoidusta etenemismallista, joka koostaa kunkin emittoivan lähteen painotettuna sen pikselin sisäisellä osuudella. Homogeenisessa paikassa ja olettamalla nousevat ja laskevat osuudet yhteneviksi yhtälö (18) voidaan kirjoittaa muotoon

$$\begin{aligned} TB_p &= +e^{-\tau_{atm}}[TB_{atm} + TB_{sk}e^{-\tau_{atm}}]r_{gp}e^{-2\tau_c} \\ &+ e^{-\tau_{atm}}[e_{gp}T_g e^{\tau_c} + T_c(1 - \omega)(1 - e^{-\tau_c})(1 + r_{gp}e^{-\tau_c})] \end{aligned} \quad (20)$$

missä termit heijastavuus  $r_{gp}$  ja emissiivisyys  $e_{gp}$  huomioivat sekä tasaisen pinnan että pinnankarkeuden vaikutuksen.

Tarkastellaan yksittäistä DGG-hilaa (halkaisija noin 15 km), jonka kohtauskulmasta riippuvia parametrejä merkitään termillä  $FV_n$ . Yksinkertaistuksen vuoksi yhtälö (20) kirjoitetaan muotoon

$$TB_p = TB_{atm} + e^{-\tau_{atm}}[TB_{atm} + TB_{sk}e^{-\tau_{atm}}]R_1 + e^{-\tau_{atm}}R_2 \quad (21)$$

missä  $R_1 = r_{gp}e^{-2\tau_c}$  ja  $R_2 = e_{gp}T_g e^{\tau_c} + T_c(1 - \omega)(1 - e^{-\tau_c})(1 + r_{gp}e^{-\tau_c})$ . Nyt fraktioiden mukaan aggregoitu etenemismalli voidaan määrittää eri kohtauskulmien summan avulla yhtälöstä (20) kun

$$R_1 = \sum_{n=1}^{NF} (FV_n R_{1,n}) \quad (22)$$

$$R_2 = \sum_{n=1}^{NF} (FV_n R_{2,n}) \quad (23)$$

$$(24)$$

Alkuarvot ja pinnanosuudet kuvaavat alueen pysyviä ominaisuuksia, mutta saattavat muuttua tilapäisten pinnanmuutosten takia. [20]

## 4.2 Kasvillisuuden vaikutus emissioon

Tässä alaluvussa kuvataan muutamien eri kasvillisuustyyppien vaikutusta emissiomalleihin.

### 4.2.1 Paljas maa

Maankosteuden mikroaaltokaukokartoitus perustuu maaperän emissiivisyyden muutokseen maankosteuden funktiona. Tämä taas johtuu siitä, että maan suhteellisen permittiivisyyden reaaliosa vaihtelee kuivan maan permittiivisyydestä ( $\epsilon_r < 4$ ) veden permittiivisyyteen ( $\epsilon_r \sim 80$ ). Kun maankosteus kasvaa, maan emissiivisyys pienenee (jos oletetaan, että kaikki muut termit pysyvät samana).

Täydellisen sileän pinnan heijastuskertoimet  $r_{bp}$  saadaan Fresnelin laista [13]:

$$r_{bp} = \frac{\left| \frac{\mu_s \cos(\theta) - \sqrt{\mu_s \epsilon_b - \sin^2(\theta)}}{\mu_s \cos(\theta) + \sqrt{\mu_s \epsilon_b - \sin^2(\theta)}} \right|}{\left| \frac{\mu_s \cos(\theta) - \sqrt{\mu_s \epsilon_b - \sin^2(\theta)}}{\mu_s \cos(\theta) + \sqrt{\mu_s \epsilon_b - \sin^2(\theta)}} \right|} \quad (25)$$

$$r_{bp} = \frac{\left| \frac{\mu_s \cos(\theta) - \sqrt{\mu_s \epsilon_b - \sin^2(\theta)}}{\mu_s \cos(\theta) + \sqrt{\mu_s \epsilon_b - \sin^2(\theta)}} \right|}{\left| \frac{\mu_s \cos(\theta) - \sqrt{\mu_s \epsilon_b - \sin^2(\theta)}}{\mu_s \cos(\theta) + \sqrt{\mu_s \epsilon_b - \sin^2(\theta)}} \right|}, \quad (26)$$

missä  $\mu_s$  on maan magneettinen permeabiliteetti, joka oletetaan ykköseksi,  $\epsilon_b$  on maanpinnan kompleksinen dielektrinen vakio ja  $\theta$  on kohtauskulma. Kirkkaustilapötilä paljaalle maalle voidaan kirjoittaa heijastuskertoimen ja maan lämpötilan funktiona [19]:

$$TB_p = (1 - r_{bp})T_g \quad (27)$$

### 4.2.2 Dobsonin dielektrinen malli

Vanhempi prosessoriversio (5.01 -versioon asti) käyttää [21] hakualgoritmissa Dobsonin mallia [22] [23] Peplinskin formulaatiolla [24] [25], jonka mukaan märän maan dielektrinen vakio voidaan laskea yhtälöllä [19]

$$\epsilon_b = \left( 1 + \frac{\rho_b}{\rho_s} (\epsilon_{pa}^\alpha - 1) + SM^{\beta'} \epsilon_{swf}^\alpha - SM \right)^{1/\alpha} - j(SM^{\beta''} \epsilon_{swf}^{\alpha})^{1/\alpha}, \quad (28)$$

missä

- $\epsilon_b$  on maan dielektrinen vakio paljaalle maalle
- $\rho_b$  on maantiheys, jonka oletusarvo on 1,3 g/cm<sup>3</sup>
- $\rho_s$  on maan hiukkastiheys, jonka oletusarvo on 2,664 g/cm<sup>3</sup>

- $\epsilon_{pa}$  on kiinteiden hiukkasten dielektrinen vakio
- $\alpha = 0,65$
- $\beta = \beta' - j\beta''$  on empiirisesti ratkaistu kompleksinen kerroin maaperälle
- SM maankosteus pitoisuus [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]
- $\epsilon'_{swf} - j\epsilon''_{swf}$  on maa-aineksessa vapaana olevan veden dielektrinen vakio, missä

$$\epsilon'_{swf} = \epsilon_{w\infty} + \frac{\epsilon_{w0} - \epsilon_{w\infty}}{1 + (2\pi f r \tau_w)^2} \quad (29)$$

$$\epsilon''_{swf} = \frac{2\pi f r \tau_w (\epsilon_{w0} - \epsilon_{w\infty})}{1 + (2\pi f r \tau_w)^2} + \frac{\sigma_{eff}}{2\pi f \epsilon_0} \frac{\rho_s - \rho_b}{\rho_s \text{SM}}, \quad (30)$$

missä

- $\epsilon_{w0}$  veden staattinen dielektrinen vakio
- $\epsilon_{w\infty}$  on ylärajataajuus veden dielektriselle vakiolle  $\epsilon_{wf}$
- $f$  on SMOS-satelliitin keskitäajuus
- $\tau_p$  on veden relaksaatioaika
- $\sigma_p$  ohminen johtavuus
- $\epsilon_0$  tyhjiön permittiivisyys

#### 4.2.3 Mironovin dielektrinen malli

Mironovin mallia [26] käytetään oletuksena uudemman prosessoriversion (5.50 ja 5.51) hakualgoritmissa [21]. Sillä on joitakin etuja Dobsonin malliin verrattuna; se on fysikaalisempi erittäin kuivalle maalle ja se kattaa laajemman kirjon eri maaperätekstuureja. Dobsonin malli asettaa esimerkiksi hiekkamaalle tiettyjä rajoitteita.

Mironovin mallissa märän maan dielektrinen vakio  $\epsilon_s = \epsilon'_s - j\epsilon''_s$  ilmaistaan käyttämällä kompleksista taitekerrointa  $n^* = \sqrt{\epsilon_s}$ . Tämä muodostetaan taitekertoimista täysin kuivalle maalle, maahan sitoituneelle ja maahan sitoutumattomalle vedelle:

$$n_s^* = n_d^* + (n_b^* - 1)(\text{SM} - \Delta_{\text{SM}} H(\Delta_{\text{SM}})) + (n_u^* - 1)(\text{SM} + \Delta_{\text{SM}} H(\Delta_{\text{SM}})), \quad (31)$$

missä  $\Delta_{\text{SM}} = \text{SM} - \text{XMVT}$  on maankosteuden ja kuihtumispisteen erotus,  $H(x)$  on Heavisiden askelfunktio, joka on  $H(x) = 1$ , kun  $x > 0$  ja  $H(x) = 0$ , kun  $x \leq 0$

Kompleksinen taitokerroin  $n_s^*$  voidaan erotella reaali-osaan  $n_s = \Re(n_s^*)$  ja normalisoituun vaimennuskertoimeen  $\kappa_s = \Im(n_s^*)$  ja näiden avulla määrittää dielektrinen vakio:

$$\epsilon'_s = n_s^2 - \kappa_s^2 \quad (32)$$

$$\epsilon''_s = -2n_s\kappa_s \quad (33)$$

Yhtälön (31) taitokerroin ja vaimennus kuivalle maalle saadaan empiirisestä funktiosta

$$n_d = ND_0 + ND_1C + ND_2C^2 \quad (34)$$

$$\kappa_d = KD_0 + KD_1C, \quad (35)$$

kertoimet maaperään sitoutuneelle ja sitoutumattomalle vedelle saadaan yhtälöistä

$$n_p = \frac{\sqrt{||\epsilon_{wp}|| + \epsilon'_{wp}}}{\sqrt{2}} \quad (36)$$

$$\kappa_p = \frac{\sqrt{||\epsilon_{wp}|| - \epsilon'_{wp}}}{\sqrt{2}}, \quad (37)$$

missä  $\epsilon_{wp} = \epsilon'_{wp} - j\epsilon''_{wp}$  on dielektrinen vakio sitoutuneelle ( $p = b$ ) ja sitoutumattomalle ( $p = u$ ) vedelle [19]:

$$\epsilon'_{wp} = \frac{\epsilon_{w\infty} + (\epsilon_{0p} - \epsilon_{w\infty})}{(1 + (2\pi f\tau_p)^2)} \quad (38)$$

$$\epsilon''_{wp} = \frac{2\pi f\tau_p(\epsilon_{0p} - \epsilon_{w\infty})}{(1 + (2\pi f\tau_p)^2)} + \frac{\sigma_p}{2\pi\epsilon_0}, \quad (39)$$

missä

- $\epsilon_{w\infty}$  on ylärajataajuus veden dielektriselle vakiolle  $\epsilon_{wf}$
- $f$  on SMOS-satelliitin keskitäajuus
- $\tau_p$  on veden relaksaatioaika
- $\sigma_p$  ohminen johtavuus
- $\epsilon_{0p}$  veden staattinen dielektrinen vakio
- $\epsilon_0$  tyhjiön permittiivisyys



#### 4.2.4 Matala kasvillisuus

Matalalla kasvillisuudella tarkoitetaan esimerkiksi niittyjä tai viljapeltoja, joiden vaikutusta voidaan approksimoida matalalla taaajuudella  $\tau - \omega$ -mallilla. Malli perustuu nimensä mukaisesti kahteen parametriin: optista syvyyttä kuvaavaan parametriin  $\tau$  ja kasvillisuuden sirontaa kuvaavaan parametriin  $\omega$ . Mallin mukaan emissio tällaisella alueella on kolmen emittoivan termin summa

- Kasvillisuuden emissio
- Kasvillisuuden emissio, joka siroaa maanpinnasta ja läpäisee kasvillisuuden
- Maanpinnan emissio, joka läpäisee kasvillisuuden

Polarisaatiosta riippuva kirkkauslämpötilan yhtälö on tällöin muotoa

$$TB_p = (1 - \omega_p)(1 - \gamma_p)(1 + \gamma_p r_{gp})T_c + (1 - r_{gp})\gamma_p T_g \quad (40)$$

missä  $T_g$  on maanpinnan efektiivinen lämpötila ja  $T_c$  kasvillisuuden efektiivinen lämpötila,  $r_{gp}$  maanpinnan heijastuskerroin,  $\omega_p$  sirontaa kuvaava parametri ja  $\gamma_p$  kasvillisuuden vaimennuskerroin.

Kasvillisuuden vaimennuskerroin on optisen syvyyden funktio:

$$\gamma_p = e^{\tau_p / \cos \theta} \quad (41)$$

Matalan kasvillisuuden tapauksessa parametri  $\omega$  on usein hyvin pieni. Esimerkiksi maissipellolle parametrin arvo on 0,1, mutta monille kasvillisuustyypeille jopa alle 0,05. Koska parametrin  $\omega$  riippuvuutta kulmasta  $\omega$  ei ole kyetty esittämään, se jätetään huomioimatta algoritmissa.

Optinen syvyys  $\tau_p$  riippuu pysyvästä kasvillisuudesta, karikkeesta ja kasvillisuuden vesipitoisuudesta:

$$\tau_p = \tau_{SP} + \tau_L + \tau_{IP}, \quad (42)$$

missä  $\tau_{SP}$  on pysyvän kasvillisuuden optinen paksuus,  $\tau_L$  puun oksien alapuolella olevan kerroksen (lähinnä karikkeen) optinen paksuus ja  $\tau_{IP}$  parametri, joka kuvaa pysyvän kasvillisuuden vesipitoisuutta. Karikkeen vesipitoisuus sisältyy termiin  $\tau_L$ .

Koska on havaittu, että termi  $\tau_{SP}$  korreloi hyvin lehtialaindeksin funktiona, algoritmissa se parametrisoidaan [19]

$$\tau_{SH}(\theta = 0) = \tau_{SV}(\theta = 0) = \tau_{S\_NAD} = b'_S LAI + b''_S, \quad (43)$$

#### 4.2.5 Metsä

Metsä on erittäin potentiaalinen tutkimuskohde, koska erityisesti Suomen alueella suuri osa maapinta-alasta on metsän peitossa. Maankosteustutkimuksissa tulokset ovat olleet lupaavia silloin, kun karikkeen määrä on vähäistä eikä metsä ole liian tiheää [27] [28] [29]. Metsä on kuitenkin haasteellinen mittauskohde monestakin syystä.

Metsän mallintamisessa  $\tau - \omega$ -malli yksinään ei ole riittävä, koska sirottavia elementtejä on enemmän. Metsäiset maankäyttöluokat voidaan luokitella kolmeen kategoriaan; havumetsät, lehtimetsät ja sekametsät. Näille kolmelle metsätyypille on laadittu aiemman tutkimuksen perusteella parametrisetit, joita käytetään alkutilanteen konfiguraatiossa.

Parametrisettien lisäksi ECOCLIMAP-tietokannasta saadaan kaksi parametria, joita tarvitaan biofysikaalisen mallin syötteenä; vuosittainen lehtialaindeksi maksimi  $LAI_{F_{max}}$ , sekä ajasta riippuva lehtialaindeksi  $LAI_V$ .

Näistä kahdesta suureesta pyritään parametrisoimaan optinen paksuus  $\tau_{F\_NAD}$  ja sirontaparametri  $\omega_F$ . Koska puiden oksien ja lehtien orientaatio vaihtelee, nämä parametrit voidaan olettaa polarisaatiosta riippumattomiksi [30].

Tämän parametrisoinnin jälkeen algoritmi toimii hyvin samankaltaisesti kuin matalan kasvillisuuden tapauksessa. Optinen kokonaissyvyys nadiirin suuntaan määritetään yhtälöllä

$$\tau_{F\_NAD} = \tau_{FA} + b_V LAI_V \quad (44)$$

missä

$$\tau_{FA} = b'_F LAI_{F_{max}} \quad (45)$$

Lopulta kirkkauslämpötila saadaan yhtälöstä [19] [20]

$$TB_p = (1 - \omega_F)(1 - \gamma)(1 + \gamma_p r_{gp})T_c + (1 - r_{gp})\gamma_p T_g, \quad (46)$$

missä

$$\gamma = e^{-\tau_{F\_NAD}/\cos\theta}, \quad (47)$$

ja parametri  $\omega_F$  voidaan olettaa vakioksi, kulmasta, polarisaatiosta, ja ajasta riippumattomaksi. Sen oletusarvona käytetään 0,08:aa [29] [30].

#### 4.2.6 Muu maankäyttö

Muuhun maankäyttöön voidaan lukea esimerkiksi hietikot, vesistöt, aavikot, kivikot, vuoristot ja kaupungit.

Hiekan voisi periaatteessa tulkita puhtaasti nominaalitapaukseksi, mutta koska sillä on erityinen vedensitomiskyky, erittäin kuivan hiekan tunkeutumissyvyys saattaa

olla merkittävän suuri. Kuivalle hiekalle käytetään usein 1,4 GHz taajuudella permittiivisyyttä [31]

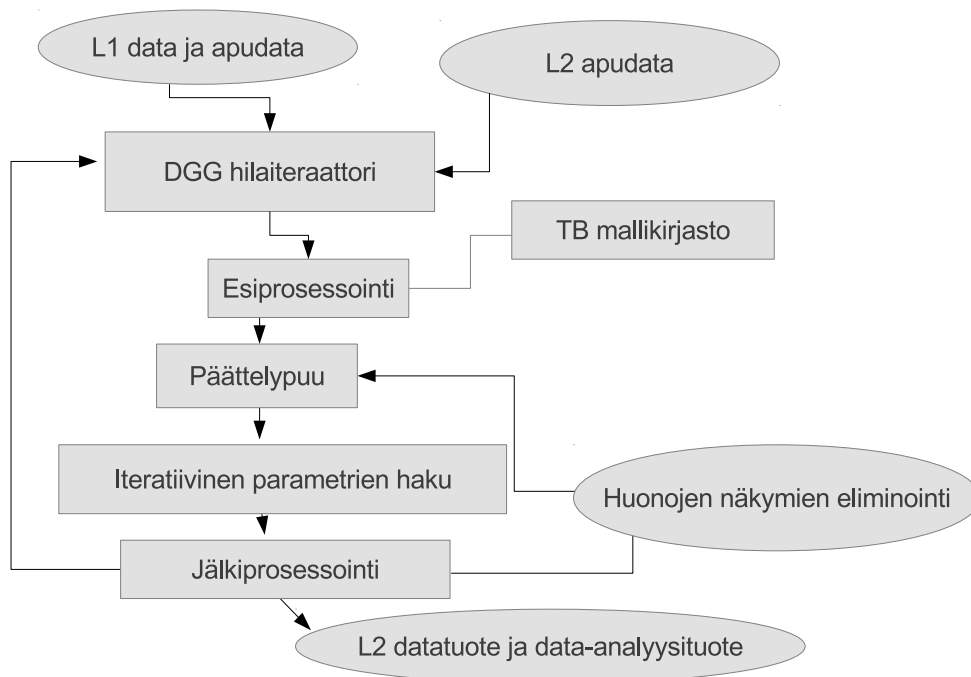
$$\epsilon_{\text{dry\_sand}} = 2,53 - 0,05j, \quad (48)$$

Etenkin Suomessa vesistöt peittävät ison osan maapinta-alasta. Jotta maankosteustulokset olisivat järkeviä, vesistöjen vaikutusta ei voida jättää huomioimatta. Vesistöjen emissio mallinnetaan olettamalla Fresnelin yhtälöiden voimassaolo ja ratkaisemalla dieletrisyysvakio tasaiselle vedenpinnalle.

Kaupunkien mallinnus on hankalaa, koska niissä esiintyy monenlaista kasvillisuutta, rakennuksia, tieverkostoa ja mahdollisesti radiotaajuisia häiriöitä. Valmiita malleja kaupunkien mallintamiseen ei vielä ole, joten niiden käyttäytymistä mallinnetaan kuten paljasta maata, käyttämällä pinnalle vastaavia parametrejä kuin kalliaille ja kivikoille. [19] [20]

### 4.3 Prosessorin päättelypuu

Prosessorin toimintaa kuvaava vuokaavio on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11: Prosessorin toiminta yksinkertaistetussa vuokaaviossa.

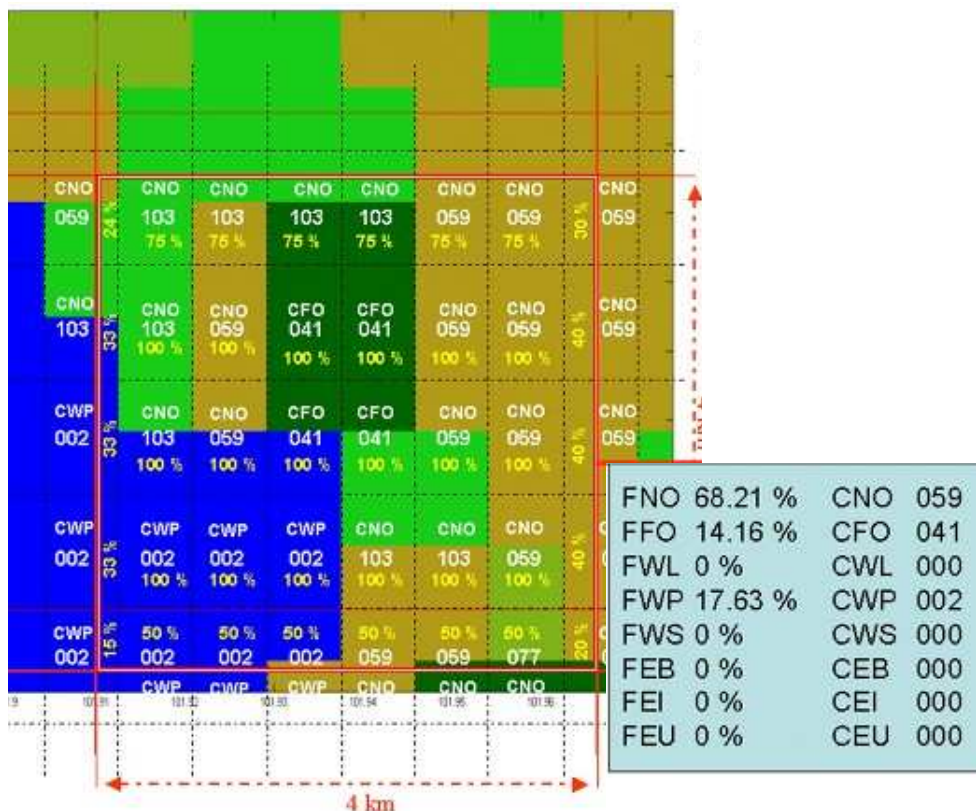
Osa prosessorille syötettävästä apudatasta on DFFG-muodossa (*Discrete Flexible Fine Grid*), kun taas osa on perustuu ISEA4-9H -järjestelmän DGG-hiloihin (*Disc-*

rete Global Grid). DFFG-järjestelmässä maapallon pinta on jaettu  $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$ -kokoisiin alueisiin kun taas ISEA4-9H -järjestelmässä heksagonaaliset hilat muodostavat pinnan, missä vierekkäisten hilojen keskipisteet ovat 15 kilometrin etäisyydellä toisistaan.

Tarkastellaan yksittäistä DFFG-pikseliä ja sen alueella esiintyviä maankäyttöluokkia (kuva 12). Apudata sisältää tiedon DFFG-pikselin eri fraktioiden prosenttiosuudesta, joiden perusteella DFFG-pikseli aggregoidaan tiettyyn fraktioon. Aggregointi tehdään tarkalleen kyseisen DFFG-pikselin prosenttiosuuksien mukaisesti, jolloin Ecoclimap-pikseliä mahdollisesti leikkaavasta DFFG-pikselistä ei koidu ongelmia.

Yleensä SMOS-signaalia vastaava pinta-ala sisältää useita eri maankäyttöluokkia, esimerkiksi metsää, viljeltyä maata ja niittyä. Yksinkertaistuksen vuoksi nämä maankäyttöluokat on ryhmitelty 12 eri yleiseen luokkaan perustuen niiden ominaisuuksiin.

Maankäyttöluokat on jaettu 17:ään fraktioon, jotka määräytyvät maankäyttöluokille ominaisten parametrien mukaan. Päättelypuun ensimmäisessä vaiheessa prosessori valitsee fraktion mukaisen aliluokan 12:sta eri vaihtoehdosta. Käytännössä valintaan on mahdollista vaikuttaa prosessorin konfiguraatiosta eri fraktioille määriteltyjä kynnsarvoja muokkaamalla.



Kuva 12: ECOCLIMAP-maankäyttöluokkien aggregointi DFFG-fraktioiksi. DFFG-hilan sisäisen maankäytön prosentit määräytyvät tarkalleen ECOCLIMAP-hilojen mukaan. Kuva muokattu viitteestä [32]. Lyhennysten selitykset ovat taulukossa 3.

Taulukko 3: Kuvassa 12 esiintyvien lyhennysten selitykset. [32]

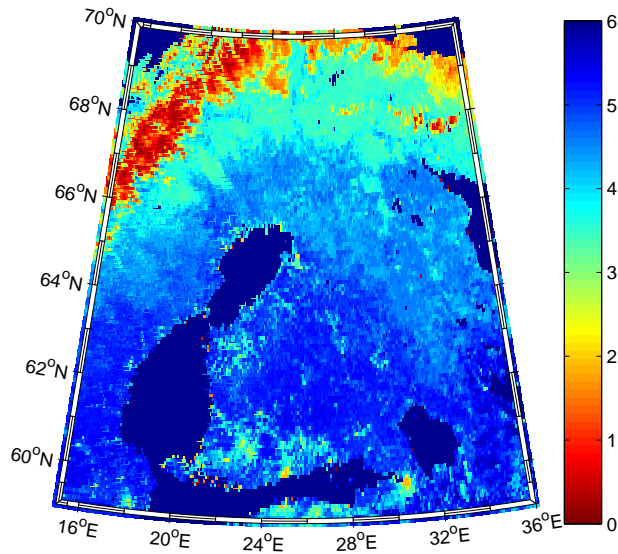
Nimi	Fraktio	ECOCLIMAP-luokka
Nominaali	FNO	CNO
Metsä	FFO	CFO
Suo	FWL	CWL
Makea vesi	FWP	CWP
Suolainen vesi	FWS	CWS
Paljas maa	FEB	CEB
Jäätikkö	FEI	CEI
Urbaani	FEU	CEU

Päätteleypuun toisessa vaiheessa valitaan kutakin tilannetta parhaiten vastaava etenemismalli. Etenemismalli saattaa olla fraktioon nähden poikkeuksellinen esimerkiksi lumen tai jään vaikutuksen takia. [19] [32]

## 5 Menetelmät ja testiaineisto

Huomattava osa tässä työssä tutkittavasta alueesta on metsän peitossa. Prosessorin maankäyttöluokitukset DFFG hilalle perustuvat globaalin ECOCLIMAP-tietokannan määnkäyttöluokkiin, joita on alun perin 215. Prosessorin tarpeisiin ECOCLIMAP-luokkia on kuitenkin lisätty, ja niitä on tällä hetkellä käytössä 242. Varalla on 13 luokkaa mahdollisia lisätarpeita varten, jolloin luokkien kokonaismäärä on 255. Pohjoisella alueella esiintyy noin 50 eri määnkäyttöluokkaa, minkä takia koko aluetta kuvaavan maankäyttökartan esittäminen ei olisi kovin havainnollista.

Sen sijaan havainnollisemmin tutkittavaa laajaa aluetta voidaan kuvata lehtialaindeksillä, joka kuvaa biomassan määrää. ECOCLIMAP-tietokantaan [33] perustuva Suomen alueen lehtialaindeksikartta 10 kilometrin resoluutiolla on esitetty kuvassa 13.

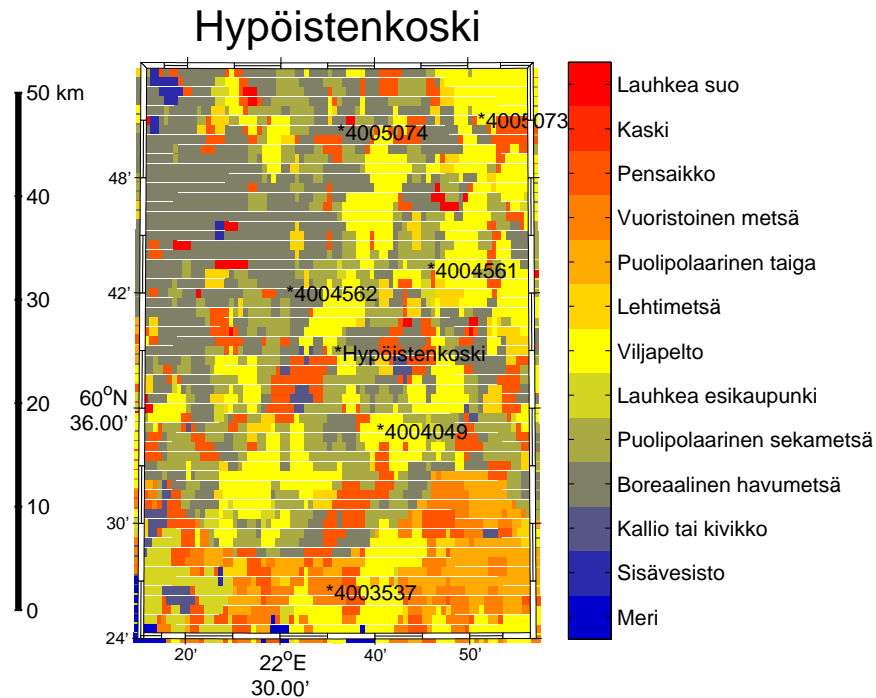


Kuva 13: Suomen alueen kuukausikohtainen lehtialaindeksi kesäkuulle ECOCLIMAP-tietokannassa [33].

Lehtialaindeksin perusteella oletetaan, että korkeiden lehtialaindeksin alueilla esiintyy runsaammin kasvillisuutta kuin matalan lehtialaindeksin alueilla. Karkeasti sanottuna korkean lehtialaindeksin aluilla (yli 5) esiintyy metsää, ja matalan (alle 4) alueilla enemmän peltoja ja aukeita.

## 5.1 Hypöistenkoski

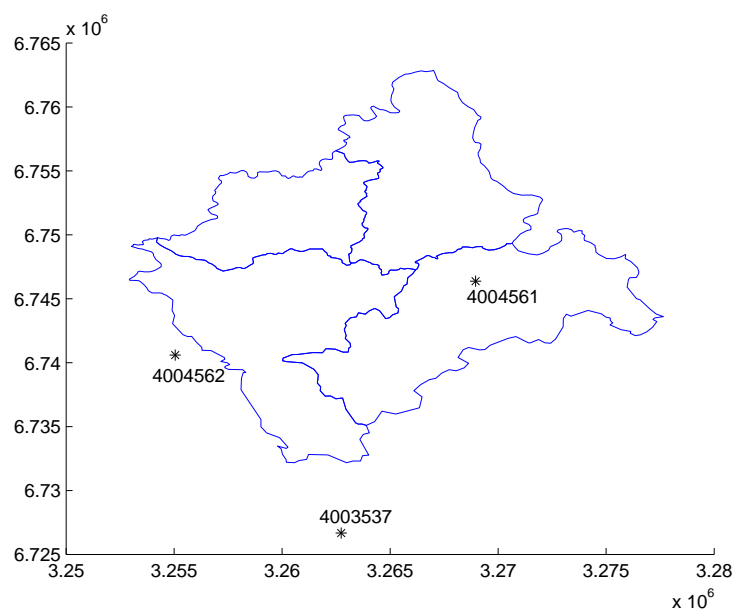
Hypöistenkosken yläpuolinen valuma-alue sijaitsee Varsinais-Suomen Aurassa. Sen lähialueella vaikuttaa kuusi SMOS-hilaa, jotka on esitetty maankäyttöluokkakartassa kuvassa 14. Hypöistenkosken alueella esiintyy eniten viljapeltoa ja boreaalista metsää, mutta myös sekametsää ja pensaikkoa esiintyy melko runsaasti. Analysoitaessa tuloksia osoittautui, että prosessori luokittelee hilat 4005074, 4005073 ja 4004049 heterogeenisiksi, jolloin niille ei ole mahdollista saada maankosteustuloksia.



Kuva 14: Hypöistenkosken maankäyttöluokkakartta. Keskellä Hypöistenkosken yläpuolinen valuma-alue ja sen ympärillä lähimmät SMOS-hilat.

Maankosteustuloksia saadaan siis hiloille 4004562, 4004561 ja 4003537. Näiden hilojen sijainti suhteessa valuma-alueeseen, joka on jaettu neljään osavaluma-alueeseen, on esitetty kuvassa 15. Suomen ympäristökeskuksen malliin vertailtavat SMOS-satelliitin mittaustulokset päätettiin tässä työssä laskea näiden kolmen hilan keskiarvosta.

Näistä kolmesta hilasta prosessori luokittelee päättelypuussa hilan 4004562 metsäfraktioon, ja hilat 4004561 sekä 4003537 matalan kasvillisuuden fraktioon. Kaikkien hilojen alueella esiintyy kuitenkin sekä nominaalia maastoa että metsää, mikä näkyy prosessointituloksien *Science flags* -taulussa.

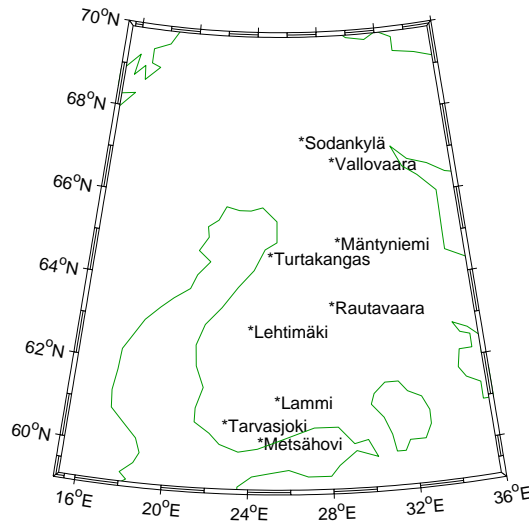


Kuva 15: Hypöistenkosken yläpuolinen mittausalue, ja sitä lähinnä olevat SMOS-hilat. SMOS-mittaus painoittuu hieman valuma-alueen etelä-osaan. Koordinaatit YKJ-järjestelmässä.



## 5.2 Automaattiasemat

Hypöistenkosken mallialueen lisäksi Suomen ympäristökeskuksella on automaattiasemia eri puolilla Suomea, ja näistä on mahdollista tehdä pistemäistä vertailua maankosteusprossessorin tuottamiin arvoihin. Automaattimittausasemat on esitetty kuvassa 16.



Kuva 16: Kuvassa Suomen ympäristökeskuksen automaattiasemat sijoitettuna Suomen kartalle.

Kullakin automaattisella mittausasemalla on useampia antureita, mutta SMOS-satelliitti mittaa lähinnä maanpinnan kosteutta, joten vertailuun käytetään ainoastaan lähimpänä maanpintaa olevien anturien mittaustuloksia. Anturit ovat tästä huolimatta pääosin syvemmällä kuin SMOS-satelliitin mittaussyvyys, joten maankosteuden käyttäytyminen ei ole täysin vertailukelpoinen. Syvemmällä maankosteuden muuttuminen saattaa olla hitaampaa kuin maan pintakerroksessa.

Automaattisten mittausasemien tarkemmat tiedot on esitetty taulukossa 4. Metsähovin mittausasemalla on kaksi anturia, joiden keskiarvoa käytetään verrattaessa SMOS-mittauksiin.

Automaattiasemista Metsähovin ja Tarvasjoen lähimmät hilat kuuluvat luokkaan Forest, muut luokkaan Low vegetation (Nominal).

Koska SMOS-satelliitin tiedettiin toimivan hyvin peltovaltaisilla alueella, valittiin tässä diplomityössä tarkasteltaviksi alueiksi lähinnä metsävaltaisia alueita. Pohjoisissa mittauskohteissa esiintyy suoalueita, joiden emissiomalleja ei vielä tunneta kovin hyvin.

Taulukko 4: Suomen ympäristökeskuksen automaattiasemien detaljit.

Mittausasema	Koodi	Lon	Lat	Syvyys [cm]	Lähin hila
Metsähovi	M22_0112	24.405	60.206	20	4002505
Lammi	M35_0104	25.219	61.177	15	4005576
Lehtimäki	M44_0802	23.798	62.875	15	4012755
Rautavaara	M04_0603	28.086	63.419	5	4014276
Mäntyniemi	M59_1207	28.552	64.956	10	4019911
Turtakangas	M57_1102	24.800	64.607	10	4018899
Vallovaara	M65_1303	28.419	66.858	10	4027598
Sodankylä	M65_1304	26.625	67.385	10	4030676
Tarvasjoki	M28_2022	22.669	60.599	10	4004048

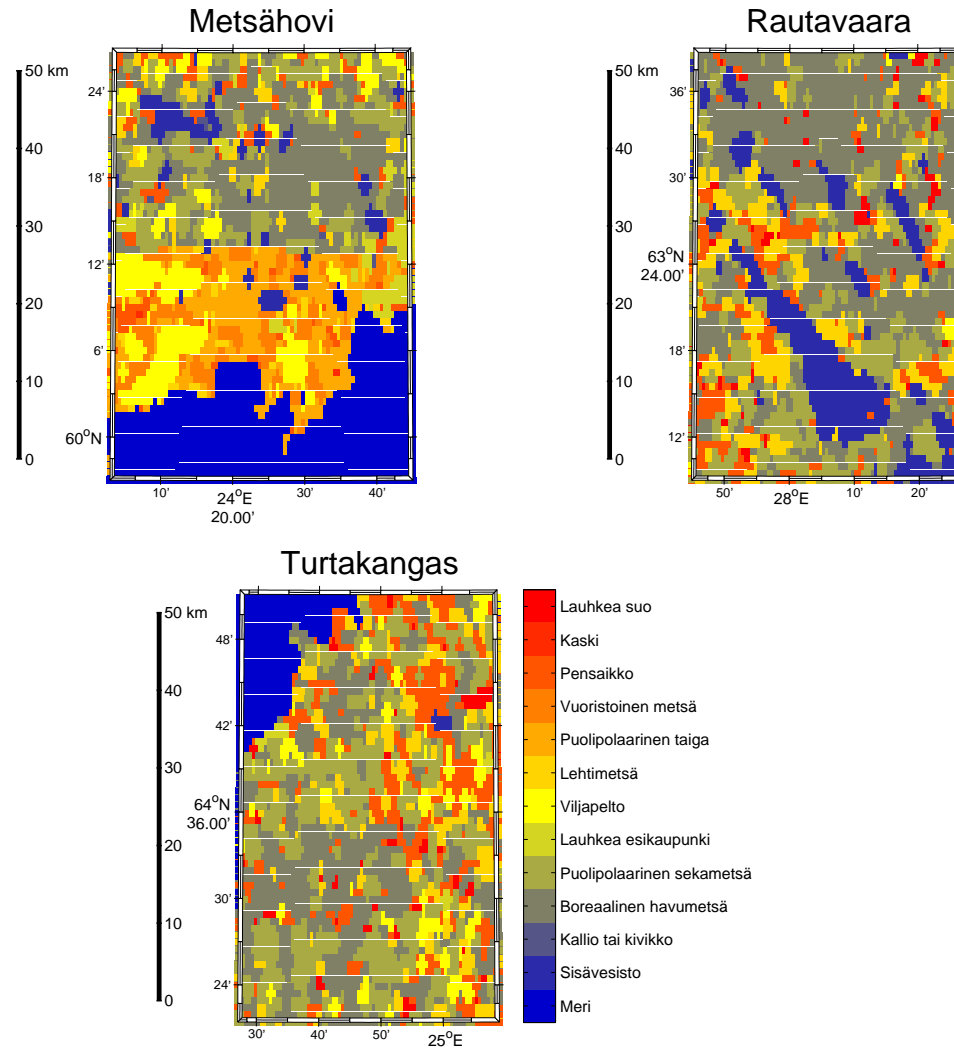
### 5.3 Syöttöparametrien ja maankäyttöluokkien muokkaus

Käytännössä menetelmät määräytyvät käytettävän testiaineiston mukaan. Koska testialueina kiinnostavimpia olivat metsäpeitteiset alueet, päätettiin prosessorille annettavista syötteistä muokata metsäalueilla vaikuttavia parametreja. Testiaineistoon valikoituneet automaattiset mittausasemat ja niiden maankäyttöluokat on esitetty kuvassa 17.

Maankäyttöluokkien ominaisuuksia voidaan muokata prosessorille syötettävissä tiedostoissa. Muokkauksen avulla voidaan hakea "sopivia"parametreja, kun tuloksia verrataan johonkin luotettavaan aineistoon. Kullekin maankäyttöluokalle on mahdollista muokata taulukossa 5 esitettyjä parametreja.

Taulukko 5: Ecoclimap luokitukseen liittyvät parametrit DFFG-hilalle Level 2 - prosessorissa.

Pinnankärkeutta kuvaava parametri	HR
Pinnankärkeuden polarisaation kytketyminen	QR
$\cos \theta$ :n potenssi H-polarisaatiolle	NR <sub>H</sub>
$\cos \theta$ :n potenssi V-polarisaatiolle	NR <sub>V</sub>
Kuivan biomassan optinen paksuus	C <sub>L</sub>
Kuiva biomassa, karike	BS <sub>L</sub>
Kerroin karikkeen kosteuden laskemiseen	a <sub>L</sub>
Kerroin karikkeen kosteuden laskemiseen	b <sub>L</sub>
Lehtialaindeksin kerroin	b' <sub>S</sub> tai b' <sub>F</sub>
Lehtialaindeksin kerroin	b'' <sub>S</sub> tai b'' <sub>F</sub>
Sirontaa kuvaava parametri	$\omega_H$ tai $\omega_F$
Sirontaparametrien erotus	DIF <sub><math>\omega</math></sub>
Optisen paksuuden kerroin h-polarisaatiolle	TT <sub>H</sub>
Optisten paksuuksien suhde	RTT
Lämpötilakerroin	B <sub>t</sub>
Pinnankarkeus	HR <sub>MIN</sub>
Referenssiarvojen epävarmuus	DLCC



Kuva 17: Testialueiden maankäyttöluokat.

Konfiguraatiota muokkaamalla pyritään saamaan Suomen alueelle kattavampaa SMOS-peittoaluetta sekä luotettavampia maankosteusarvoja, vertaamalla muutoksilla aikaansaatuja maankosteuksia mitattuihin arvoihin. Tavoitteena on saada prosessorin arvot vastaamaan mm. Suomen ympäristökeskuksen mittausasemilta saatuja arvoja.

### 5.3.1 Lehtialaindeksin kertoimen muokkaus

Lehtialaindeksiä muokattiin testialueilla esiintyville metsäluokille (Boreaalinen havumetsä ja puolipolaarinen sekametsä). Tavoitteena oli kokeilla, miten lehtialaindeksin kertoimen muokkaaminen vaikuttaa maankosteusarvoihin.

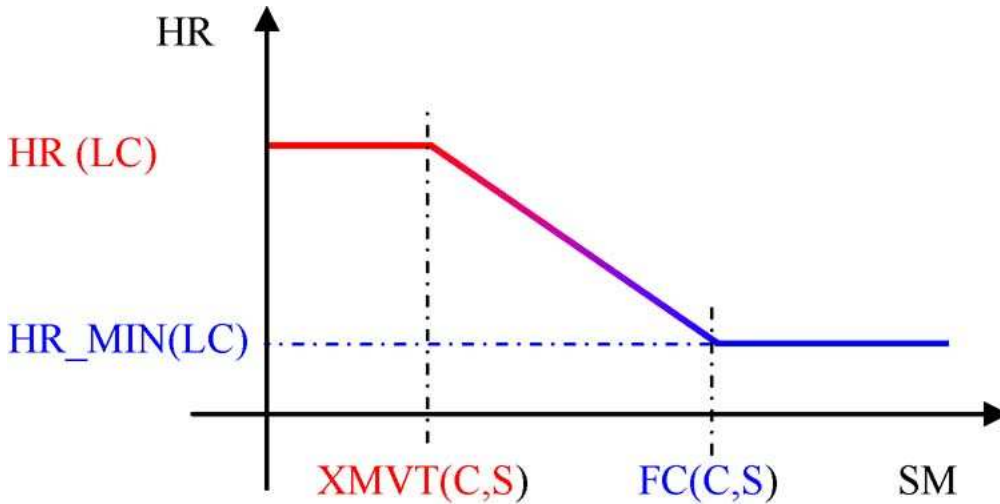
### 5.3.2 Pinnankarkeus

Pinnankarkeuden kasvaessa kulmariippuvainen kirkkauslämpötila muuttuu, jolloin Fresnelin lakia korjataan empiirisellä yhtälöllä [20]

$$r_{gp}(\theta) = ((1 - QR)r_{gp} + QRr_{bq})e^{-HR(SM)\cos^{NR_p}(\theta)}, \quad (49)$$

missä QR on polarisaation kytkeytymiskerroin, HR on efektiivinen dimensioton karkeusparametri  $HR = (2k\sigma)$ , missä  $k$  on aaltoluku ja  $\sigma$  on pinnan neliöllinen korkeus,  $NR_p$  on pinnankarkeuden vaikutusta kohtauskulmaan parametrisoiva kokonaisluku ja  $r_{bq}$  ilmaisee sileän pinnan heijastusta vaihtoehtoiselle polarisaatiolle. Tämän empiirisen yhtälön on havaittu hyvin toimivaksi useissa testeissä, kunhan tietyt varoimenpiteet huomioidaan.

Tutkimukset ovat kuitenkin osoittaneet [34]-[35], että L-alueella pinnankarkeus tarkoittaa enemmän maaperän pinnalla valitsevaa kosteusjakaumaa kuin geometristä pinnankarkeutta. Pinnankarkeusparametrien vaikutusta maankosteuteen kuvaa käyrä kuvassa 18. Metsäalueilla vallitsevissa maankäyttöluokissa 11 ja 31 pinnankarkeusparametrit ovat oletusarvoisesti  $HR\_MIN = HR = 0,3$ , jolloin pinnankarkeuden vaihteluita ei oteta huomioon.



Kuva 18: Pinnankarkeus maankosteuden funktiona [20]. Kuihtumispiste XMVT ja kentän kapasiteetti FC ovat suhteellisen hiekkamäärän S ja savimäärän C funktioita.

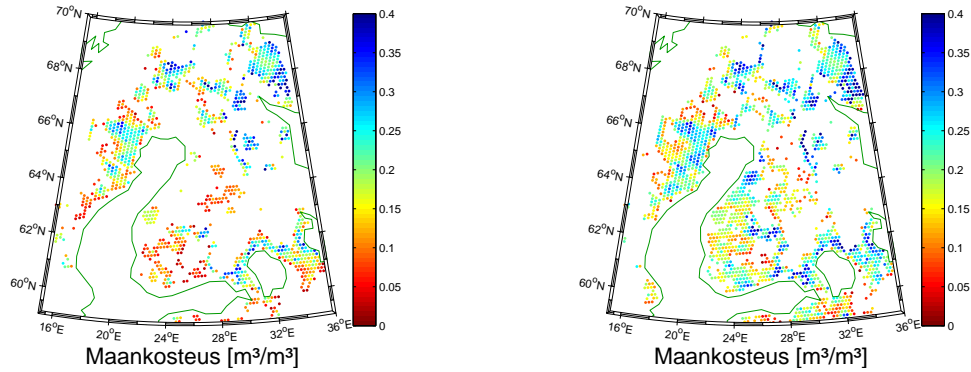
## 5.4 Radiotaajuisten häiriöiden suodatus

Radiometri mittaa signaalia, joka on hyvin heikkotehoista. Suojatusta taajuuskais-tasta huolimatta taajuusalueella esiintyy aina enemmän tai vähemmän radiotaajui-sia häiriötä, jotka ylittävät radiometrin mittauskohteen emission. Tässä työssä radio-taajuisten häiriöiden vaikutus näkyy muun muassa laskevien ylilentojen maankos-teustuloksissa. Aikaisemman tutkimuksen [36] mukaan nousevilla ylilennoilla esiin-

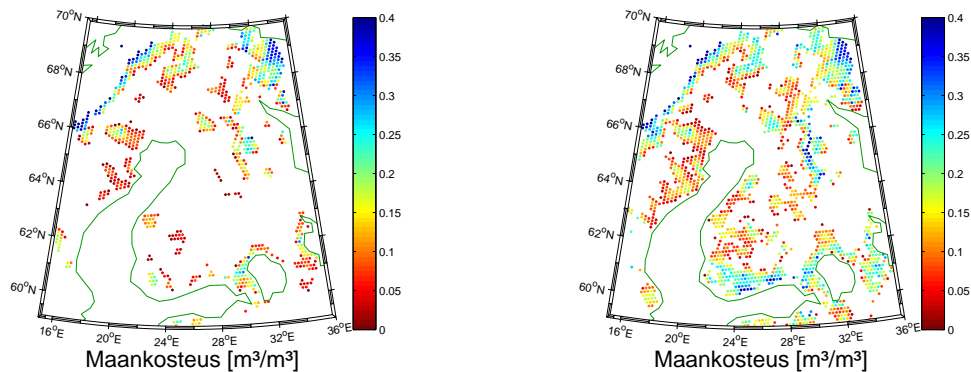
tyy globaalisti runsaammin häiriöitä kuin laskevilla radoilla, mutta Suomen alueen osalta laskevat radat ovat häiriöisempiä.

## 6 Tulokset

Oletuskonfiguraatiolla maankosteusprossori antoi Suomen alueelle varsin pientä maankosteuspeittoa. Muokkaamalla konfiguraatiota siten, että prosessori voi valita metsän ja matalan kasvillisuuden fraktioille etenemismallin joko metsän tai matalan kasvillisuuden mukaan, saatiin prosessorista maankosteuksia useammille Suomen alueen hiloille. Kahden alkukesän ylilennon tuloksia muutoksen vaikutuksesta on esitelty kuvissa 19 – 20.



Kuva 19: 1.6.2011 ylilento vasemmalla oletuskonfiguraatiolla ja oikealla muokatulla konfiguraatiolla.

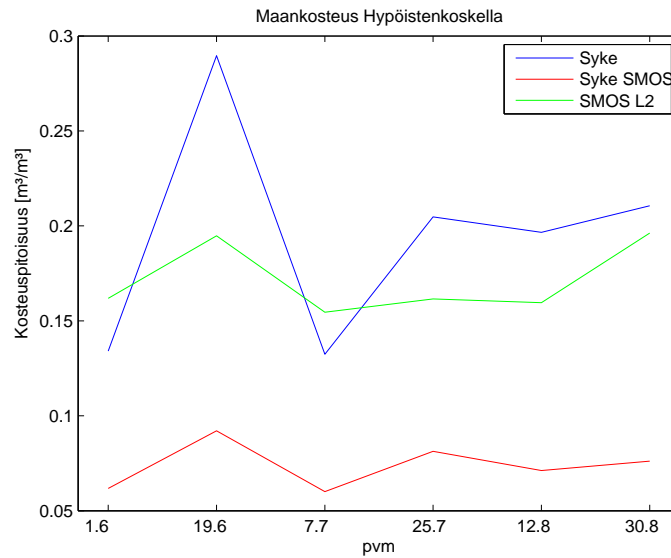


Kuva 20: 19.6.2011 ylilento vasemmalla oletuskonfiguraatiolla ja oikealla muokatulla konfiguraatiolla.

### 6.1 Hypöistenkosken yläpuolinen mittausalue

Suomen ympäristökeskus laskee maankosteuden alueelle SMOS-hiloista jakamalla alueen yhden kilometrin hiloihin, joille kullekin lasketaan etäisyyden mukaan käänteisesti painotettu keskiarvo 3-4:sta lähimmästä SMOS-hilasta (joista havaintoja on). Näistä kilometrin hiloista lasketaan keskiarvot kolmelle osavaluma-alueelle ja niistä edelleen pinta-alapainotetut keskiarvot koko Hypöistenkosken valuma-alueelle.

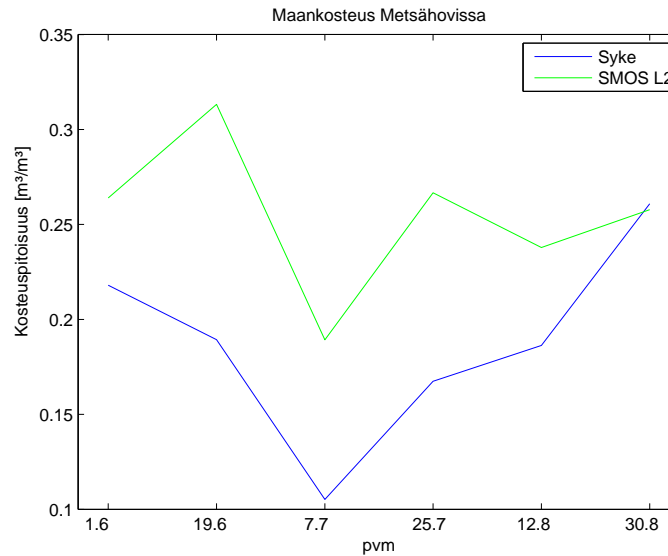
Kuvassa 21 on esitetty Suomen ympäristökeskuksen kaksikerrosmallilla simuloitu maankosteus Hypöistenkoskelle sekä maankosteusprosesorin tulokset. Punainen käyrä on Suomen ympäristökeskuksen SMOS-hiloista laskema käyrä, mutta prosessoinnissa on käytetty erilaista konfiguraatiota kuin meidän laskemassa vihreässä käyrässä. Kuten oli odotettavissa, SMOS-satelliitti toimii hyvin peltovaltaisilla alueilla.



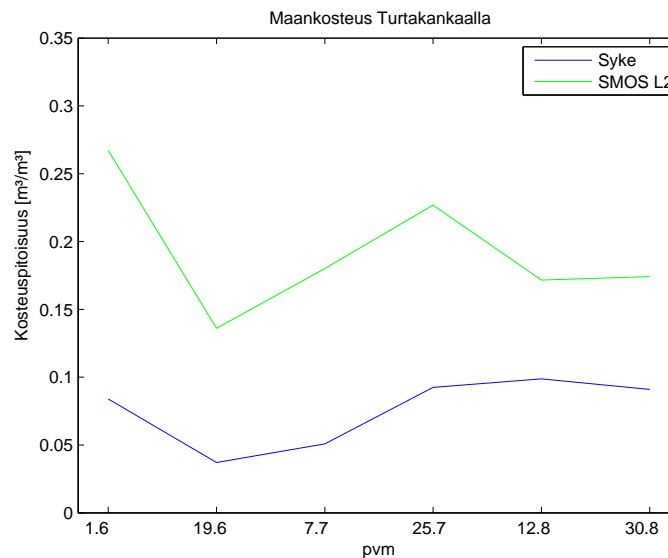
Kuva 21: Kuvassa Suomen ympäristökeskuksen mitaamat arvot ja SMOS-simulaatiot sekä SMOS L2-prosessorin prosessoimat maankosteudet Hypöistenkoskelle kesällä 2011.

## 6.2 Testialueet

Maankosteustulokset tarkasteltavilta automaattisilta mittausasemilta on esitetty kuvissa 22 ja 23. Rautavaarasta ei saatu kesän kaikille ylilennoille tuloksia ennen parametrien muokkaamista.



Kuva 22: Maankosteus Metsähovissa kesällä 2011.



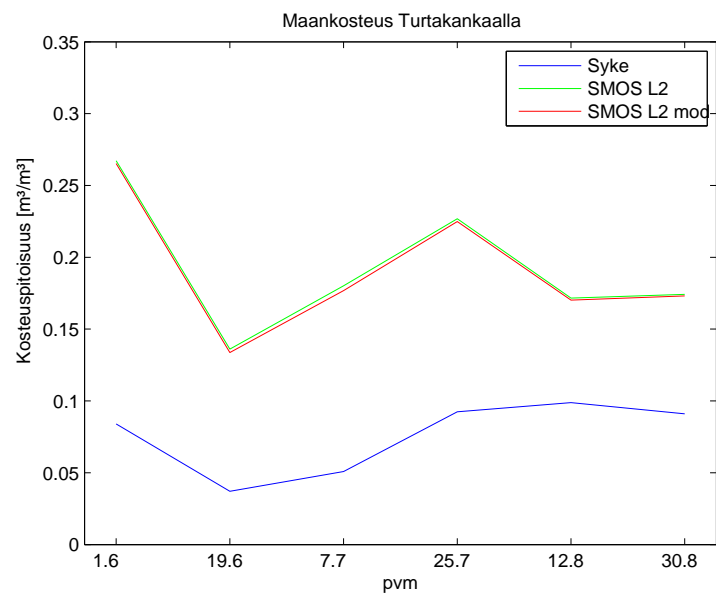
Kuva 23: Maankosteus Turtakankaalla kesällä 2011.

### 6.2.1 Lehtialaindeksin kertoimen muokkaus

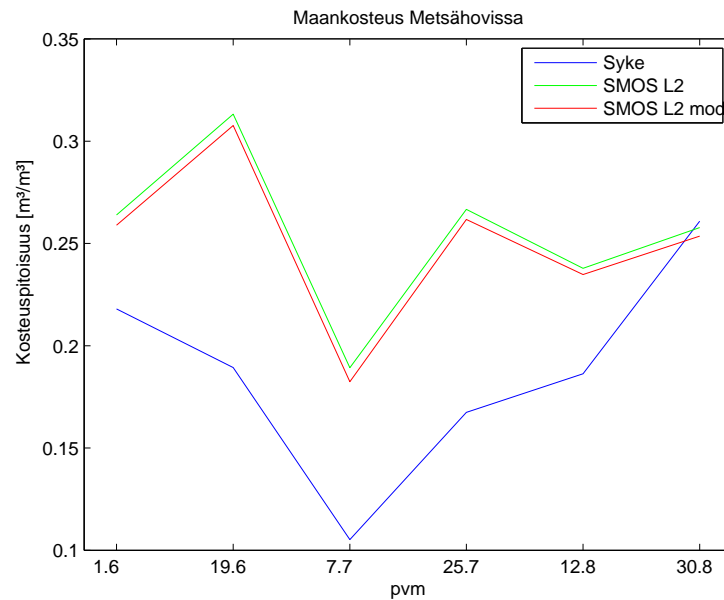
Osoittautui, että maankosteusarvot eivät muutu merkittävästi lehtialaindeksin kertoimen funktiona, kun kerroin on välillä 0,1 – 0,4. Kuvissa 24 ja 25 on esitetty lehtialaindeksin kertoimen vaikutus maankosteuteen kahdella mittauspisteellä. Kertoimien pienentämisellä saatiin kuitenkin parannettua maankosteuspeittoa tutkitavalla alueella, ja sen ansiosta muun muassa Rautavaaran mittauspisteen lähistöllä



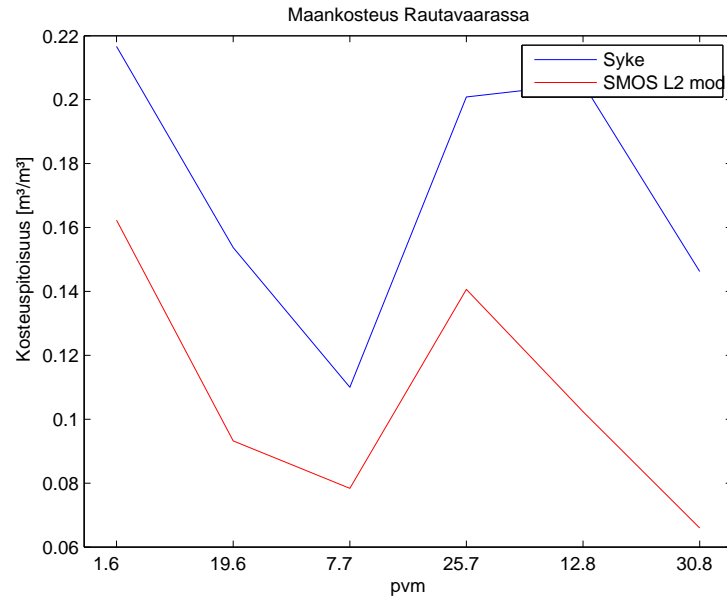
oleva hila antoi tuloksia kaikilta kesän 2011 ylilennoilta. Rautavaaran kohde näyttää tulosten (kuva 26) perusteella varsin lupaavalta.



Kuva 24: Muutoksen vaikutus Turtakankaalla kesällä 2011.



Kuva 25: Muutoksen vaikutus Metsähovissa kesällä 2011.

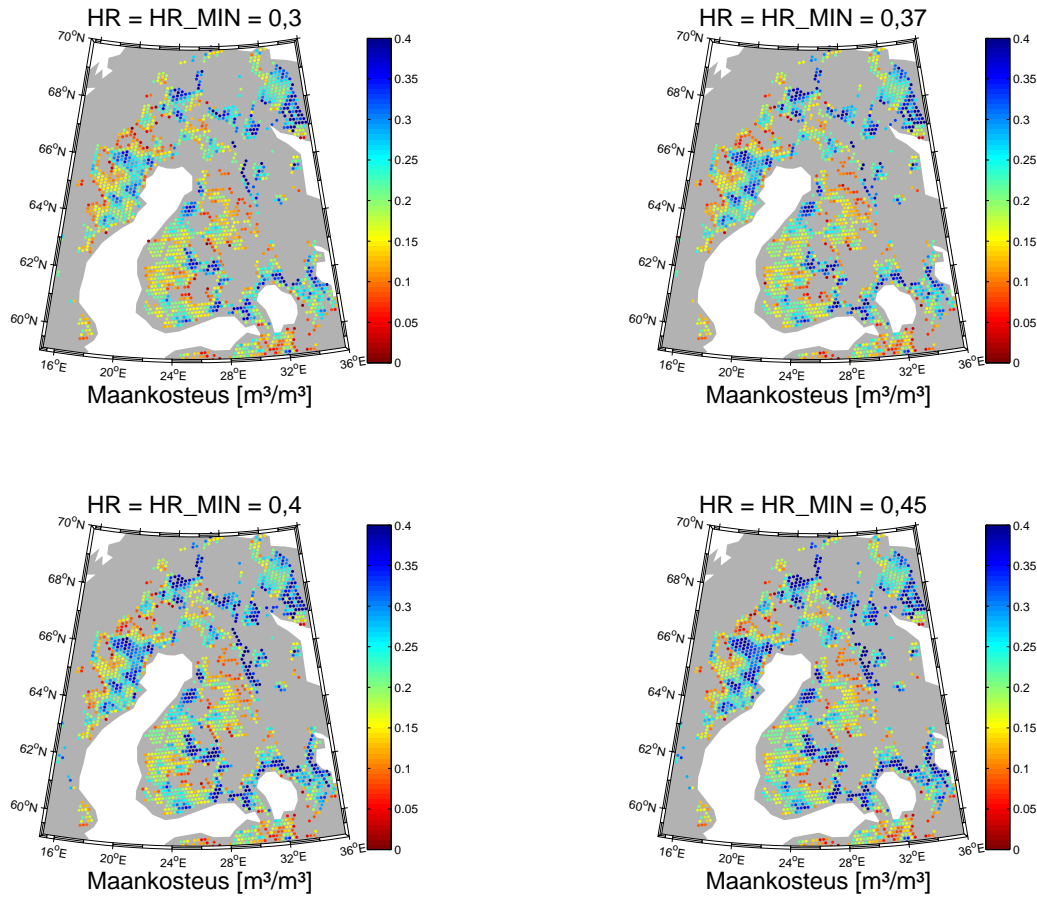


Kuva 26: Maankosteus Rautavaarassa muutoksen jälkeen kesällä 2011.

### 6.3 Pinnankarkeuden muokkaus

Pinnankarkeutta kuvaavan parametrin kasvattaminen nostaa maankosteusarvoja, mutta aiheuttaa maankosteuden luotettavuutta kuvaavan hyvyysluvun heikkenemisen.

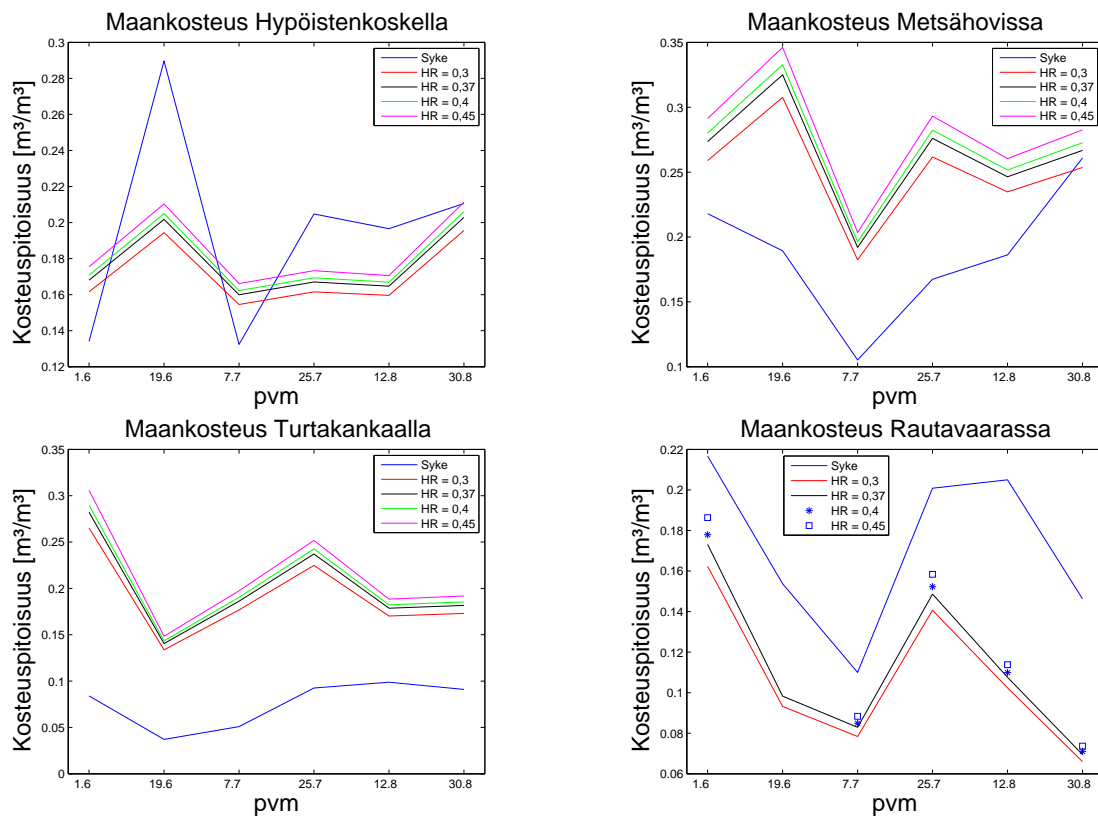
Ongelma voidaan ratkaista nostamalla hyvyyslukuindeksin kynnysarvoa. Kuva 27 havainnollistaa maankäyttöluokkien 11 ja 31 pinnankarkeusparametrien muokkauksen vaikutusta. Parametrin arvon nostaminen johtaa maankosteusarvojen kasvamiseen, mutta hyvyyslukuindeksin heikkenemiseen. Tämän seurauksena muun muassa parametrin arvolla 0,37 Ylä-Kainuun ympäristössä maankosteustulokset vähenevät. Parametrien arvoilla 0,4 ja 0,45 hyvyyslukuindeksin kynnysarvoa kasvatettiin, jolloin Ylä-Kainuun ympäristöön saatiin taas tuloksia.



Kuva 27: 1.6.2011 ylilento metsäluokille 11 ja 31 muutamilla eri pinnankarkeusarvoilla.

### 6.3.1 Testialueet

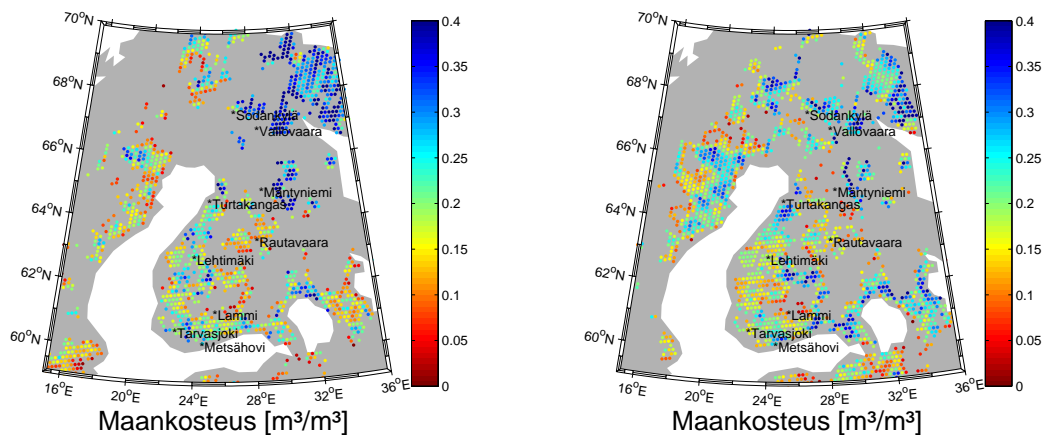
Muutoksen vaikutus testialueilla näkyy kuvassa 28. Osa vertailukohteista saattaa sijaita SMOS:in kannalta huonossa paikoissa: muun muassa Metsähovista merelle on matkaa noin 15 km ja Turtakankaalta noin 20 km. Prosessori huomioi pienten sisävesistöjen vaikutuksen muuttamalla niitä vastaavat maankäytöt niitä lähinnä olevien maankäyttöjen mukaisiksi, mutta laaja-alaisen vesistön tapauksessa tämä ei toimi.



Kuva 28: Pinnankarkeuden vaikutus muutamilla testialueilla kesällä 2011.

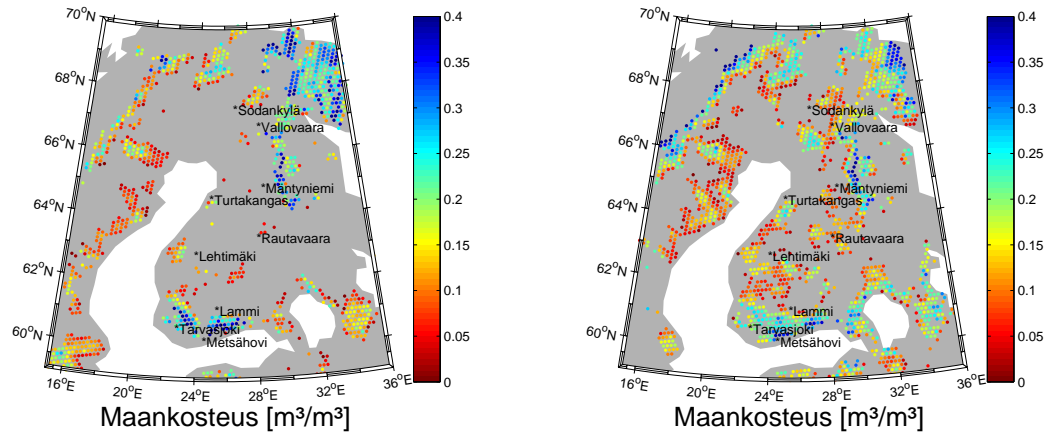
## 6.4 Radiotaajuiset häiriöt

Laskevilta radoilta ei saada nykyisellään kovin kattavaa maankosteuspeittoa. Laskevan radan peitto on yleensä pienempi kuin nousevan, mikä näkyy kuvissa 29 – 30.



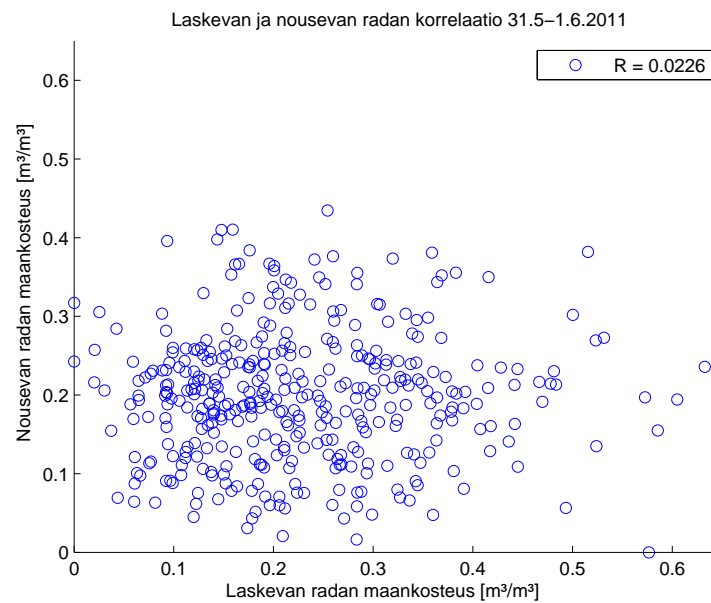
Kuva 29: Laskeva rata 31.5.2011 ja nouseva 1.6.2011.

Tämän lisäksi laskevien ratojen tulokset korreloivat huonosti nousevien ratojen tu-



Kuva 30: Laskeva rata 18.6.2011 ja nouseva 19.6.2011.

loksiin (ks. kuva 31). Yksi tulevaisuuden tutkimuskohteista onkin SMOS-aineiston radiotaajuisten häiriöiden (RFI) suodattaminen eri menetelmiä käyttäen.

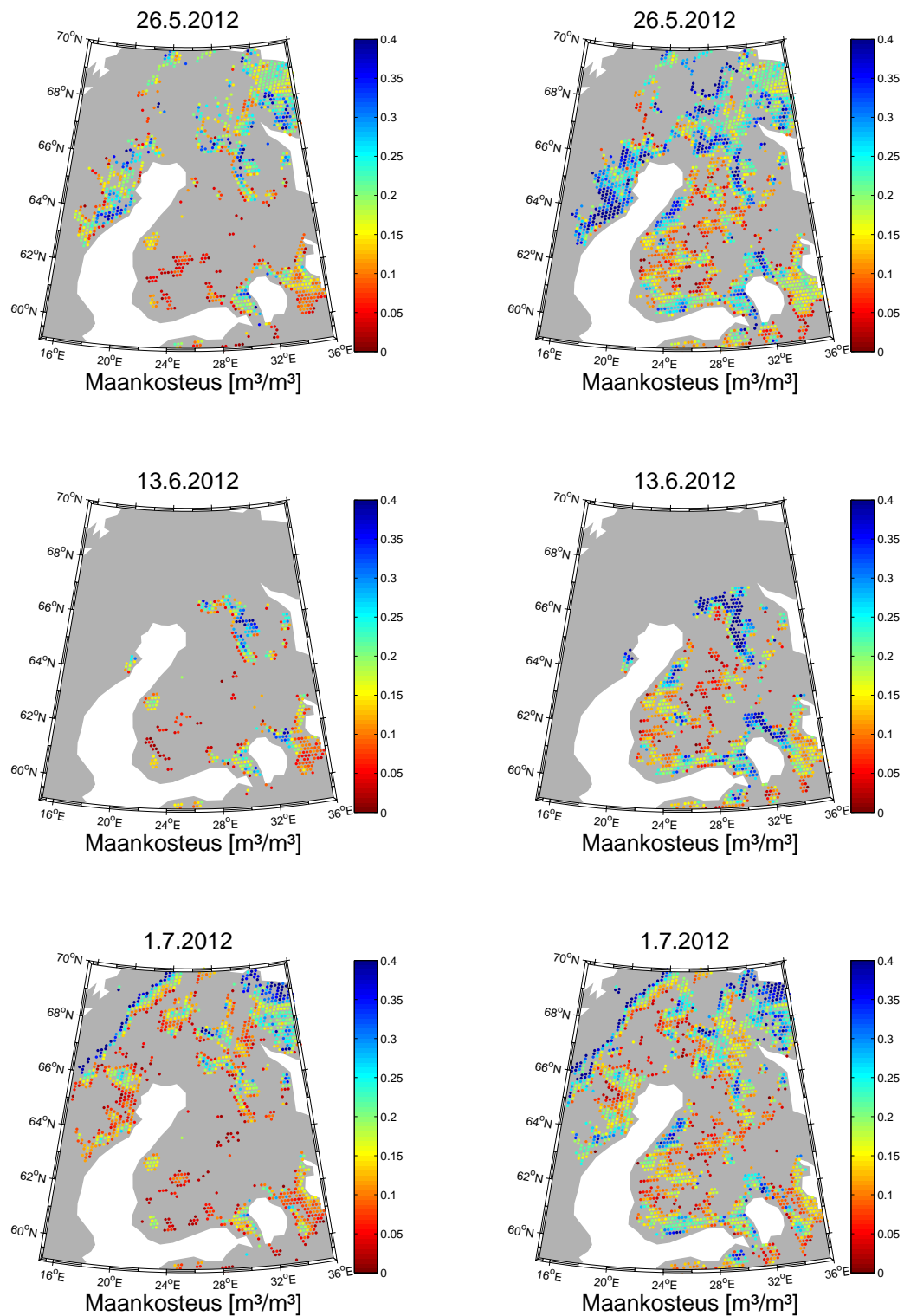


Kuva 31: Laskevien ja nousevien ratojen välinen korrelaatio ylilennoilta 31.5–1.6.2011.

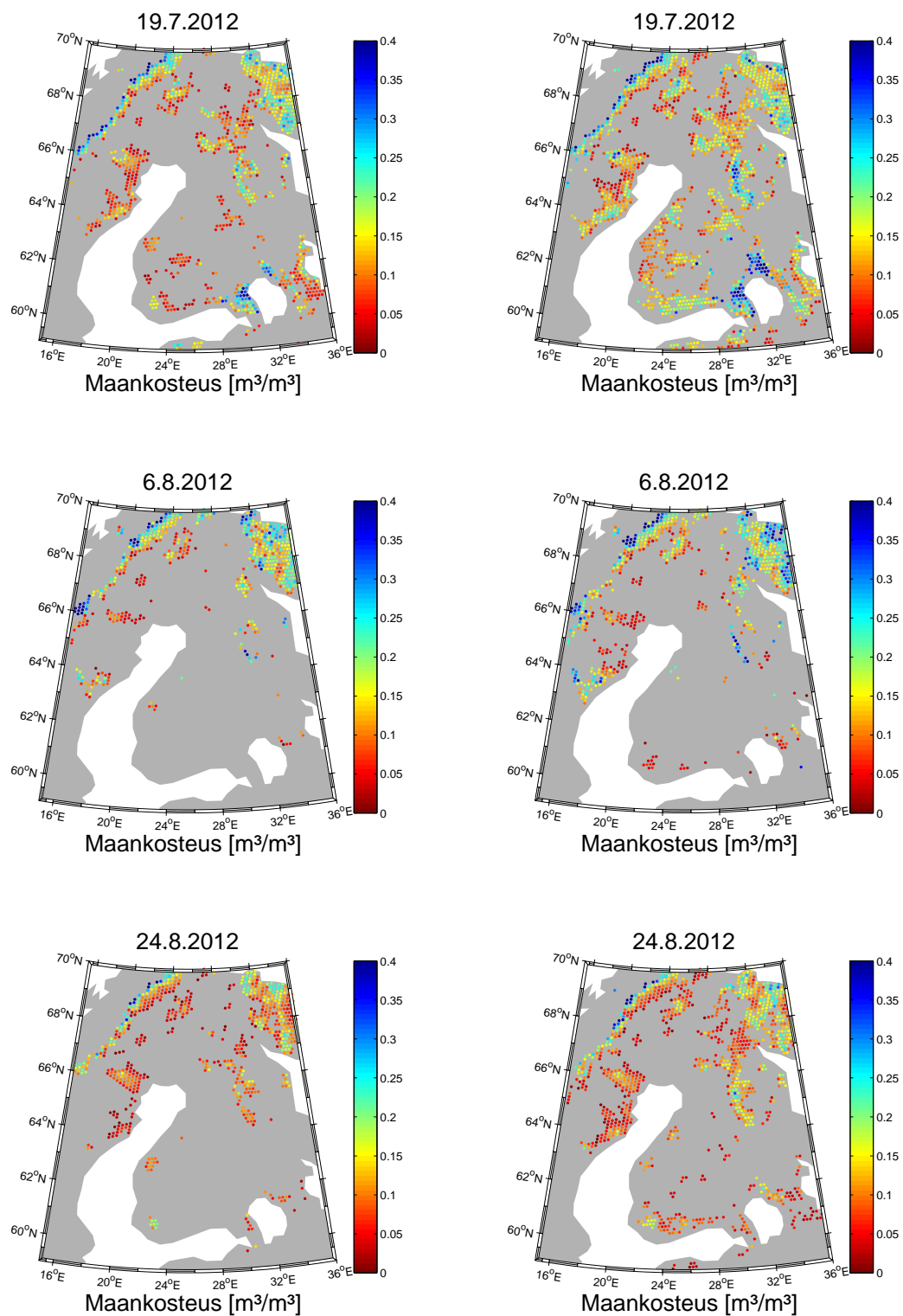
## 7 Vertailua ESA:n jakamaan Level 2 -dataan

Proessorin tuloksia arvioitiin lopuksi vertaamalla niitä ESA:n jakamaan Level 2 -dataan. Koska ESA:n jakamasta datasta ainoastaan uudemmat on prosessoitu viimeisimmällä prosessoriversiolla, suoritettiin vertailu 2012 kesän ylilennoista. Vuoden 2012 ylilentojen Level 1 -datoja eikä apudatoja oltu kirjoitushetkellä vielä uudelleen-prosessoitu, minkä takia tulokset ovat huonompia verrattuna 2011 vuoden datoihin. Toisaalta Level 2-data on prosessoitu samalla prosessoriversiolla ja samoilla syöttötiedostoilla.

Kuvissa 32 ja 33 on esitetty rinnakkain ESA:n ja tässä työssä käytetyn SMOS L2 -proessorin maankosteustuloksia vuoden 2012 nousevita ylilennoilta. Pohjanmaalla oli loppukesän aikana tulvia, jotka todennäköisesti ovat vaikuttaneet siihen, että tulokset ovat loppukesän osalta vajavaisia.



Kuva 32: Kesän 2012 ylilentojen maankosteudet Suomen alueella, vasemmalla ESA:n prosessoinnin tulokset ja oikealla muokatuilla prosessoinneilla saadut tulokset.



Kuva 33: Kesän 2012 ylilentojen maankosteudet Suomen alueella, vasemmalla ESA:n prosessoinnin tulokset ja oikealla muokatuilla prosessoinneilla saadut tulokset.



## 8 Yhteenveto

Tässä työssä on tutkittu maankosteuden mittaamista satelliitista interferometrisella radiometrillä ja verrattu mittaustuloksia maanpäällisiin mittaustuloksiin sekä hydrologisen mallin tuloksiin Suomen alueelta. Satelliittimittauksesta on tehty aiempaa-kin tutkimusta runsaasti, mutta tämä diplomityö keskittyi pääasiassa mittauksiin Suomen alueelta, missä maankosteuksia oli prosessoinnilla saatu vain hyvin pieneltä pinta-alalta. Satelliittimittauksen haasteita Suomessa ovat muun muassa metsät ja suot, joiden emissioiden mallintaminen on hankalaa. Diplomityön lähtökohtana oli selvittää, voidaanko maankosteusprosessorin parametreja muuttamalla saada aikaan parannusta Suomen alueen mittauksiin.

Parametreista muokattiin tässä työssä biomassan vaikutusta ja maanpinnan karkeutta kuvaavia parametreja. Parametreja pyrittiin optimoimaan siten, että maankosteustulosten alueellinen kattavuus olisi mahdollisimman hyvä ja että vertailualueilta mitatut maankosteudet olisivat mahdollisimman lähellä Suomen ympäristökeskuksen toimittamaa vertailuaineistoa. Parametrien optimointi osoittautui hankalaksi, koska joillakin alueilla maankosteuksia olisi pitänyt saada nousemaan, ja toisilla taas laskemaan. Parametrien muuttaminen metsien maankäyttöluokille vaikutti kaikille testialueille samansuuntaisesti, joko maankosteuksia nostavasti tai laskevasti. Pinnan karkeuden muokkaamisella saatiin merkittäviä muutoksia, kun taas lehtialaindeksin kerroin ei vaikuttanut merkittävästi. Lehtialaindeksin kertoimen muokkauksella saatu hyöty oli käytännössä tulosten kattavuuden paraneminen.

Validointiin liittyy myös ongelmia, joista yksi on satelliitin spatiaalinen resoluutio, ja siihen vertailtavissa olevan maankosteusaineiston saatavuus. On ilmeistä, että jos verrataan satelliitin resoluutiolla mitattuja tuloksia maanpäällisiin pistemittauksiin, ne eivät ole täysin vertailukelpoisia. Maankosteus riippuu sekä ajasta että paikasta. Esimerkiksi maankosteusmittari saattaa näyttää muutaman metrin päässä toisistaan oleville mittauspisteille aivan eri kosteuspitoisuuksia. Suomen ympäristökeskuksella oli kuitenkin tarjota myös paremmin vertailukelpoista kaksikerrosmallilla simuloitua dataa Hypöistenkosken alueelta. Käytännössä kuitenkin analysointia varten tulosten vertailua pitäisi suorittaa pidemmällä aikavälillä, ehkä jopa kahden vuoden ajalta. Tämän diplomityön kirjoittamisen aikana tämänhetkiselle prosessoriversiolle kelpaavaa uudelleenprosessoitua dataa oli saatavissa ainoastaan vuodelta 2011.

Radiotaajuisten häiriöiden vaikutus käy ilmi muun muassa laskevien ratojen epäonnistuneista maankosteusmittauksista. Työn aikana verrattiin laskevien ratojen tuloksia nouseviin ratoihin, ja havaittiin, että niiden välinen korrelaatio on hyvin pieni. Vaikka laskevan radan mittaus on noin 8 – 10 tuntia edellä nousevan ylilennon mittauksista, voisi mittaustulosten välillä olettaa olevan korrelaatiota.

## Viitteet

- [1] Cesbio, “Measuring the moisture in the Earth’s soil,” 2003. [http://www.cesbio.ups-tlse.fr/data\\_all/SMOS-doc/ESA\\_Bull.pdf](http://www.cesbio.ups-tlse.fr/data_all/SMOS-doc/ESA_Bull.pdf), viitattu 18.2.2013.
- [2] Cesbio, “Soil moisture and ocean salinity (SMOS),” 2012. <http://www.cesbio.ups-tlse.fr/us/indexsmos.html>, viitattu 19.11.2012.
- [3] A. Camps, M. Vall-llossera, N. Duffo, F. Torres, and I. Corbella, “Performance of sea surface salinity and soil moisture retrieval algorithms with different auxiliary datasets in 2-D L-band aperture synthesis interferometric radiometers,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 43, no. 5, pp. 1189 – 1200, 2005.
- [4] ESA, “SMOS mission overview.” [http://www.esa.int/esaLP/ESAL3B2VMOC\\_LPsmos\\_0.html](http://www.esa.int/esaLP/ESAL3B2VMOC_LPsmos_0.html), viitattu 15.10.2012.
- [5] Y. Kerr, P. Waldteufel, J.-P. Wigneron, S. Delwart, F. Cabot, J. Boutin, M.-J. Escorihuela, J. Font, N. Reul, C. Gruhier, S. Juglea, M. Drinkwater, A. Hahne, M. Martin-Neira, and S. Mecklenburg, “The smos mission: New tool for monitoring key elements of the global water cycle,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 98, no. 5, pp. 666 – 687, 2010.
- [6] ESA, “SMOS - space segment - instrument.” <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/smos/space-segment/instrument>, viitattu 19.2.2013.
- [7] A. Khazaal and E. Anterrieu, “SMOS image reconstruction algorithm: Extension of the band limited approach to the fully-polarimetric mode of MIRAS,” in *International Conference on Advances in Computational Tools for Engineering Applications, ACTEA '09.*, pp. 180 – 185, 2009.
- [8] M. Martin-Neira, S. Ribó, and A. J. Martín-Polegre, “Polarimetric mode of MIRAS,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 40, no. 8, pp. 1755 – 1768, 2002.
- [9] ESA, “Soil moisture CCI,” 2012. <http://www.esa-soilmoisture-cci.org/node/145>, viitattu 1.10.2012.
- [10] Y. Y. Liu, W. A. Dorigo, R. Parinussac, R. de Jeuc, W. Wagner, M. McCabe, J. Evansd, and A. van Dijke, “Trend-preserving blending of passive and active microwave soil moisture retrievals,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 123, pp. 280 – 297, 2012.
- [11] W. Wagner, W. Dorigo, R. de Jeu, D. Fernandez, J. Benveniste, E. Haas, and M. Ertl, “Fusion of active and passive microwave observations to create an essential climate variable data record on soil moisture,” in *XXII ISPRS Congress, Melbourne, Australia. (In Press)*, 2012.

- [12] Cesbio, “SMOS blog, SMOS soil moisture field,” 2010. [http://www.cesbio.ups-tlse.fr/SMOS\\_blog/?p=740](http://www.cesbio.ups-tlse.fr/SMOS_blog/?p=740), viitattu 19.11.2012.
- [13] F. T. Ulaby, R. K. Moore, and A. K. Fung, *Microwave Remote Sensing, Active and Passive*. Addison-Wesley, 1981.
- [14] A. Räisänen and A. Lehto, *Radiotekniikka*. Otatieto, 1995.
- [15] S. J. Orfanidis, “Electromagnetic waves and antennas,” 2010. <http://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa/>, viitattu 20.10.2012.
- [16] L. Graham, “Synthetic interferometer radar for topographic mapping,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 62, no. 6, pp. 763 – 768, 1974.
- [17] C. Ruf, C. Swift, A. Tanner, and D. Le Vine, “Interferometric synthetic aperture microwave radiometry for the remote sensing of the earth,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 26, no. 5, pp. 597 – 611, 1988.
- [18] A. Camps, “SMOS, principle of operation & first results,” 2010. <http://www.slideshare.net/adrianocamps/miras-the-smos-instrument>, viitattu 10.10.2012.
- [19] Array Systems Computing Inc., *Algorithm Theoretic Basis Document for the SMOS Level 2 Soil Moisture Processor Development Continuation Project*. Toronto, Ontario, Canada, 2011.
- [20] Y. Kerr, P. Waldteufel, P. Richaume, J. Wigneron, P. Ferrazzoli, A. Mahmoodi, A. A. Bitar, F. Cabot, C. Gruhier, S. Juglea, D. Leroux, A. Mialon, and S. Delwart, “The SMOS soil moisture retrieval algorithm,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 50, no. 5, pp. 1384 – 1403, 2012.
- [21] Expert Support Laboratory Level 2 Soil Moisture and ARRAY, “Read-me-first note for the release of the SMOS level 2 Soil Moisture data products (Level 2 Soil Moisture v 5.51),” 2012.
- [22] M. C. Dobson, F. T. Ulaby, M. T. Hallikainen, and M. A. Elrayes, “Microwave dielectric behavior of wet soil – part 2: Dielectric mixing models,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 23, no. 1, pp. 35 – 46, 1985.
- [23] M. T. Hallikainen, F. T. Ulaby, M. C. Dobson, M. A. Elrayes, and L. K. Wu, “Microwave dielectric behavior of wet soil – part 1: Empirical models and experimental observations,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 23, no. 1, pp. 25 – 34, 1985.
- [24] N. R. Peplinski, F. T. Ulaby, and M. C. Dobson, “Dielectric properties of soils in the 0.3-1.3 GHz range,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, no. 3, pp. 803 – 807, 1995.

- [25] N. R. Peplinski, F. T. Ulaby, and M. C. Dobson, "Corrections to dielectric properties of soils in the 0.3-1.3 GHz range," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, no. 6, p. 1340, 1995.
- [26] V. L. Mironov and S. V. Fomin, "Temperature and mineralogy dependable model for microwave dielectric spectra of moist soils." presented at the PIERS, Moscow Russia, 20.2.2009.
- [27] P. O'Neill, R. Lang, M. Kurum, A. Joseph, M. Cosh, and T. Jackson, "Microwave soil moisture retrieval under trees using a modified tau-omega model," in *Proc. IGARSS, Cape Town South, Africa*, 2009.
- [28] E. Santi, S. Paloscia, P. Pampaloni, and S. Pettinato, "Ground-based microwave investigations of forest plots in Italy," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, no. 9, pp. 3016 – 3025, 2009.
- [29] R. Rahmoune, P. Ferrazzoli, J. P. Walker, and J. P. Grant, "L-band emission from a eucalyptus forest in various soil conditions during the NAFE campaign," in *Proc. MicroRad, Washington, DC*, pp. 81 – 85, 2010.
- [30] A. D. Vecchia and P. Ferrazzoli, "A large scale approach to estimate L band emission from forest covered surfaces." Tor Vergata University, Technical note SO-TN-TV-GS-0001-01.a, 21.2.2006.
- [31] C. Mätzler, "Microwave permittivity of dry sand," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 36, no. 1, pp. 317 – 319, 1998.
- [32] Array Systems Computing Inc., *Table Generation Requirement Document (TGRD) for the SMOS Level 2 Soil Moisture Processor Development Continuation Project*. Toronto, Ontario, Canada, 2011.
- [33] V. Masson, J.-L. Champeaux, F. Chauvin, C. Meriguet, and R. Lacaze, "A global database of land surface parameters at 1 km resolution in meteorological and climate models," *Journal of Climate*, vol. 16, pp. 1261 – 1282, 2003.
- [34] M. J. Escorihuela, Y. Kerr, P. de Rosnay, J. P. Wigneron, J. C. Calvet, and F. Lemaitre, "A simple modeling of a bare soil emission at L-band and soil moisture retrieval on the SMOSREX site," in *MicroRad, San Juan Puerto Rico*, 2006.
- [35] M. J. Escorihuela, Y. Kerr, P. de Rosnay, J. P. Wigneron, J. C. Calvet, and F. Lemaitre, "A simple model of the bare soil microwave emission at L-band," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 45, pp. 1978 – 1987, 2007.
- [36] A. Enqvist, "Radiotaajuiset häiriöt ja niiden tunnistaminen SMOS-ympäristösatelliitin mittauksista Suomen alueella." Diplomityö, Aalto-yliopisto, 2012.

## Liite A

### A Ecoclimap -maanpintaluokittelu

Testialueilla esiintyvien maankäyttöluokkien alkuperäiset nimet on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6: Testialueilla esiintyvien maankäyttöluokkien koodit, nimet ja käännökset.

Koodi	Nimi	Suomenkielinen käännös
238	Temperate wetlands	Lauhkea suo
237	Burnt areas	Kaski
223	Estremadura (GR)	Pensaikko
218	Mountain mixed forest	Vuoristoinen metsä
212	Subpolar Taiga	Puolipolaarinen taiga
205	Balkanish broad-leaved Forest	Lehtimetsä
169	Ukrainian crops	Viljapelto
153	Temperate sub-urban	Lauhkea esikaupunki
31	NH Subpolar (MF)	Puolipolaarinen sekametsä
11	Boreal (ENF)	Boreaalinen havumetsä
5	Rocks	Kallio tai kivikko
2	Inland waters	Sisävesistö
1	Sea and ocean	Meri

## Liite B

### B Prosessoinneissa käytetyt ylilennot

Tässä liitteessä on listattu diplomityössä käytetyt ylilennot.

#### B.1 Nousevat ylilennot 2011

SM\_REPR\_MIR\_SCLF1C\_20110601T022347\_20110601T031706\_504\_001\_5  
SM\_REPR\_MIR\_SCLF1C\_20110619T022303\_20110619T031621\_504\_001\_5  
SM\_REPR\_MIR\_SCLF1C\_20110707T022212\_20110707T031529\_504\_001\_5  
SM\_REPR\_MIR\_SCLF1C\_20110725T022126\_20110725T031443\_504\_001\_5  
SM\_REPR\_MIR\_SCLF1C\_20110812T022100\_20110812T031420\_504\_001\_5  
SM\_REPR\_MIR\_SCLF1C\_20110830T022032\_20110830T031352\_504\_001\_5

#### B.2 Laskevat ylilennot 2011

SM\_REPR\_MIR\_SCLF1C\_20110531T171328\_20110531T180640\_504\_001\_5  
SM\_REPR\_MIR\_SCLF1C\_20110618T171244\_20110618T180556\_504\_001\_5  
SM\_REPR\_MIR\_SCLF1C\_20110706T171151\_20110706T180505\_504\_001\_5  
SM\_REPR\_MIR\_SCLF1C\_20110724T171105\_20110724T180419\_504\_001\_5  
SM\_REPR\_MIR\_SCLF1C\_20110811T171042\_20110811T180354\_504\_001\_5  
SM\_REPR\_MIR\_SCLF1C\_20110829T171014\_20110829T180326\_504\_001\_5

#### B.3 Nousevat ylilennot 2012

SM\_OPER\_MIR\_SCSF1C\_20120526T021024\_20120526T030343\_505\_001\_1  
SM\_OPER\_MIR\_SCLF1C\_20120613T020927\_20120613T030246\_505\_001\_1  
SM\_OPER\_MIR\_SCLF1C\_20120701T020856\_20120701T030214\_505\_001\_1  
SM\_OPER\_MIR\_SCLF1C\_20120719T020832\_20120719T030151\_505\_001\_1  
SM\_OPER\_MIR\_SCLF1C\_20120806T020804\_20120806T030122\_505\_001\_1  
SM\_OPER\_MIR\_SCLF1C\_20120824T020726\_20120824T030045\_505\_001\_1